

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA:**

**INGENIERÍA AMBIENTAL**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:  
INGENIERA AMBIENTAL**

**TEMA:**

**ANÁLISIS GEOESPACIAL PARA LA DETERMINACIÓN DE VAPOR DE  
AGUA TROPOSFÉRICO CON DATOS DE GPS EN ECUADOR**

**AUTORA:**

**LIZBETH CAROLINA LEMA SÁNCHEZ**

**TUTORA:**

**MARÍA SHEILA FABIOLA SERRANO VINCENTI**

**Quito, agosto del 2018**

## **CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR**

Yo, Lema Sánchez Lizbeth Carolina, con documento de identificación N.º 171456377-0, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autora del trabajo de titulación intitulado: “ANÁLISIS GEOESPACIAL PARA LA DETERMINACIÓN DE VAPOR DE AGUA TROPOSFÉRICO CON DATOS DE GPS EN ECUADOR”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: INGENIERA AMBIENTAL, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autora me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



FIRMA

LIZBETH CAROLINA LEMA SANCHEZ

CI: 171456377-0

Fecha: agosto del 2018

## **DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTORA**

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo experimental, ANÁLISIS GEOESPACIAL PARA LA DETERMINACIÓN DE VAPOR DE AGUA TROPOSFÉRICO CON DATOS DE GPS EN ECUADOR, realizado por Lizbeth Carolina Lema Sánchez, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, agosto del 2018



**FIRMA**

**MARÍA SHEILA FABIOLA SERRANO VINCENTI**

**CI: 171026757-4**

## DEDICATORIA

*“No temas, porque yo estoy contigo;  
no desmayes, porque yo soy tu Dios que te esfuerzo;  
siempre te ayudaré, siempre te sustentaré con la diestra de mi justicia.”*

*Isaías 41:10*

Dios, quien me regala la dicha de poder vivir sin ser merecedora para ser luz en las tinieblas y me da fuerza día a día para afrontar y no desfallecer ante las barreras que se presentan constantemente, ocupa el primer lugar en mi vida y dedico este logro académico a Él por otorgarme su gracia infinita y un corazón valiente que ha hecho que alcance una meta más en esta Tierra sin dejar de lado mi fe y el anhelo de alcanzar la maravillosa meta celestial.

A mi madre, Lidia Sánchez, mujer fuerte y virtuosa que con su amor y paciencia me ha inspirado a levantarme después de las muchas caídas para continuar con mis sueños. Ella es el mejor Ángel que Dios escogió para que llenara mi vida de felicidad desde el día de mi existencia.

A mi padre Mauro Lema, hombre entregado a la obra de Dios, que, gracias a sus infinitas bendiciones y oraciones, he podido prosperar henchida de su amor. Su apoyo en todos los aspectos ha hecho que quiera llegar aún más lejos y entregar todo de mí con humildad y ahínco en cualquier labor, demostrando lo mejor de mí.

A mi hermana Ayelén Lema, joven alegre y responsable, que me ha dado la motivación para continuar con mis propósitos y ser su ejemplo a seguir para que se sienta orgullosa de mí a cada instante.

A mis amados abuelitos por su apoyo incondicional y gratos consejos que me han dado siempre

A mi primo José Lema, quien me ha inspirado desde niña a plantearme grandes metas sin temor a errar.

A toda mi familia en general por demostrarme que la unión hace la fuerza e inculcarme los más bellos valores que hacen de mí lo que soy.

**Lizbeth Carolina Lema Sánchez**

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero empezar agradeciendo con mucho cariño a la prestigiosa Universidad Politécnica Salesiana, por darme cabida para formarme como honrada ciudadana, buena cristiana y profesional.

A la carrera de Ingeniería Ambiental, carrera del presente y del futuro que, gracias a sus grandes catedráticos, hacen de ella una carrera de grandes esfuerzos para crecer en conocimiento científico y destacarnos en amplias ramas a través de la investigación y así como profesionales, poder resolver problemáticas de diversos aspectos ambientales en nuestra comunidad y en nuestro país, para una mejora continua.

A todos mis queridos docentes por sus enseñanzas e instrucciones que me han impartido durante toda la carrera.

A mi querida tutora Sheila Serrano Vincenti, que me ha guiado con sus amplios conocimientos a la realización de este trabajo experimental, y porque me ha enseñado a desenvolverme en el campo de la Investigación como asistente editorial, a través de la Revista Ciencias de la Vida “La Granja”.

A todos los entes encargados de las diversas Instituciones, que ha hecho posible la realización de este trabajo experimental, facilitándome la información requerida.

A todas las personas especiales que ocupan un lugar en mi mente y corazón, que, con sus palabras de aliento, consejos e inolvidables momentos han marcado mi vida.

Lizbeth Carolina Lema Sánchez

## ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. OBJETIVOS .....	4
2.1. Objetivo General .....	4
2.2. Objetivos Específicos .....	4
3. MARCO TEÓRICO .....	5
3.1 El agua y su ciclo hidrológico .....	5
3.1.2 Fases del agua .....	7
3.2 Vapor de agua y vapor de agua troposférico .....	9
3.2.1 Sistemas de detección de vapor de agua .....	11
3.3 Precipitaciones extremas y vapor de agua troposférico: últimas investigaciones. ....	15
3.4 Estimación de vapor de agua a través del retraso troposférico del GPS .....	16
3.4.1 GPS ( <i>Global Positioning System</i> ).....	16
3.4.2 Componentes de sistema de GPS.....	17
3.4.2.1 Segmento de control.....	17
3.4.2.2 Segmento espacial.....	18
3.4.2.3 Segmento usuario .....	20
3.4.3 La señal GPS.....	21

3.4.4 Funcionamiento de los GPS.....	21
3.4.5 Fuentes de error .....	22
3.4.5.1 Errores relativos al satélite .....	22
3.4.5.1.1 Error del reloj del satélite .....	22
3.4.5.1.2 Errores en los parámetros orbitales .....	23
3.4.5.2 Retrasos relativos a la propagación de la señal.....	24
3.4.5.2.1 Retraso Ionosférico.....	24
3.4.5.2.2 Retraso troposférico .....	25
3.4.5.3 Errores relativos al receptor .....	25
3.4.5.3.1 Error en el estacionamiento de la antena.....	25
3.4.5.3.2 Error en la manipulación de los equipos .....	26
3.4.6 Equipos GPS del Mercado .....	26
3.5 Estimación de la cantidad de vapor de agua a través del retraso de la señal GPS	29
4. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO .....	32
4.1 Ubicación Geográfica y Extensión del Ecuador.....	32
4.2. Clima .....	34
4.2.1 Precipitación .....	34
4.2.1.1 Precipitaciones regionales .....	35
4.2.2 Temperatura .....	36
4.2.1.1 Temperatura Regional.....	36

5. MATERIALES Y MÉTODOS .....	37
5.1 Materiales y Equipos .....	37
5.2 Métodos .....	38
5.2.1. Recolección de datos GPS en IG-EPN (Institituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional) .....	38
5.2.1.2 Recolección de datos INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología) .....	42
5.2.1.3 Recolección de Datos del FONAG .....	44
5.2.1.4 Recolección de datos del EPMAPS .....	46
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	47
6.1 Análisis de resultados .....	47
6.1.2 Selección de receptores GPS .....	53
6.2 Análisis geoespacial para la selección de las estaciones GPS y estaciones meteorológicas automáticas .....	54
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	71
7.1 CONCLUSIONES .....	71
7.2 RECOMEDACIONES .....	72
8. BIBLIOGRAFÍA .....	73
9. ANEXOS .....	78



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Materiales y equipos utilizados.....	37
Tabla 2 Datos de latitud y longitud de los receptores GPS en el Ecuador.....	39
Tabla 3 Coordenadas de las estaciones meteorológicas del FONAG .....	44
Tabla 4 Porcentaje de datos nulos y válidos de las estaciones meteorológicas automáticas seleccionadas del INAMHI.....	55
Tabla 5 Porcentaje de datos nulos y válidos de las estaciones meteorológicas automáticas seleccionadas del FONAG.....	58
Tabla 6 Descripción de las 20 estaciones meteorológicas automáticas del INAMHI y 1 del FONAG.....	64
Tabla 7 Descripción de los 27 receptores GPS geodésicos del IG-EPN.....	65

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Estructura del Agua .....	6
Figura 2 Ciclo Hidrológico .....	7
Figura 3 Vapor de Agua (GAS) – Fases del agua.....	10
Figura 4 Canales de microondas eligen frecuencias con diferentes capacidades de detección .....	12
Figura 5 Radiosonda .....	13
Figura 6 Radiómetro MFRSR .....	14
Figura 7 Estaciones de control que permiten el funcionamiento global de los GPS .....	18
Figura 8 Segmento Espacial.....	19
Figura 9 Errores en los parámetros orbitales .....	23
Figura 10 Error Inosférico.....	24
Figura 11 GPS - GIS .....	28
Figura 12 Mapa de la República del Ecuador .....	33
Figura 13 Distribución de receptores GPS/GNSS de la red de Geodesia para monitoreo de la deformación tectónica .....	42
Figura 14 Ubicación de receptores GPS geodésicos en Ecuador.....	48
Figura 15 Estaciones Meteorológicas Convencionales y Automáticas del INAMHI en el Ecuador .....	50
Figura 16 Estaciones Meteorológicas Automáticas del INAMHI en el Ecuador .....	51
Figura 17 Estaciones meteorológicas del FONAG .....	52
Figura 18 Estaciones Meteorológicas Automáticas del FONAG en el Ecuador. ....	53

Figura 19 Porcentaje de las estaciones meteorológicas automáticas eliminadas y estaciones meteorológicas automáticas utilizadas del INAMHI.....	56
Figura 20 Porcentaje de datos validos de las estaciones meteorológicas automáticas del INAMHI.....	57
Figura 21 Porcentaje de las estaciones meteorológicas automáticas eliminadas y estaciones meteorológicas automáticas utilizadas del FONAG.....	58
Figura 22 Porcentaje de datos válidos de las estaciones meteorológicas del FONAG...	59
Figura 23 Área de influencia de 10 kilómetros de cada receptor GPS, que abarca a las estaciones meteorológicas automáticas de INAMHI como del FONAG.....	60
Figura 24 Receptores GPS y estaciones meteorológicas del INAMHI y del FONAG definitivos en el Ecuador.....	62
Figura 25 Códigos de los receptores GPS y estaciones meteorológicas del INAMHI y del FONAG definitivos en el Ecuador .....	63
Figura 26 Pisos climáticos a los que se encuentran ubicadas las estaciones meteorológicas automáticas del INAMHI y FONAG, en el Ecuador.....	68

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 Base de datos de los receptores GPS geodésicos (Plataforma virtual de acceso-UNAVCO) .....	78
----------------------------------------------------------------------------------------------------	----

## **RESUMEN**

El objetivo de la presente investigación es analizar geoespacialmente la distribución de los receptores GPS y estaciones meteorológicas en el Ecuador para identificar al menos tres zonas con distinta climatología y lograr relacionar el vapor de agua obtenido del retraso troposférico de la señal de GPS, ya que se ha encontrado que el vapor de agua troposférico es un predictor plausible de la lluvia intensa. Para el efecto se utilizaron los datos meteorológicos con una resolución infra horaria y con disponibilidad desde el 2010 del INAMHI y FONAG, mientras que los datos de GPS fueron tomados de la RENGEO del IG, los cuales cuentan con una resolución temporal de 15 y 30 segundos desde 1996. Se realizó una selección de estaciones basándose en un área de influencia con un radio de 10 km de cada GPS, teniendo un total de 27 puntos de receptores GPS multifrecuencia localizados en las tres regiones del Ecuador, distribuidos con un 22% en la Sierra, 70% en la Costa y 7% en la Amazonía; y en cuanto a las estaciones meteorológicas automáticas se seleccionaron 20 estaciones del INAMHI y 1 estación del FONAG, distribuidas con el 24% en la Costa, 71% en la Sierra y 5% en la Amazonia, cubriendo todos los pisos altitudinales excepto el templado que comprende de 1000 a 2000 m.s.n.m.

Finalmente, para determinar el vapor de agua con el retraso troposférico de la señal de GPS de las regiones climáticas del Ecuador y la data, servirá para crear un sistema de alerta temprana ante eventos de lluvia intensa con la suficiente anticipación y resolución temporal.

**PALABRAS CLAVES:** Análisis Geoespacial, Ecuador, retraso troposférico, GPS, vapor de agua troposférico.

## **ABSTRACT**

The objective of this investigation is to analyze the distribution of GPS receivers and meteorological stations geospatially in Ecuador. This information allows to identify at least three zones with different climates and managing the water vapor obtained from the tropospheric delay of the GPS signal. Because it has found that tropospheric, water vapor is a plausible predictor of intense rain. This research, meteorological data was used along with an infra-hour resolution and available information since 2010 from INAMHI and FONAG, while the GPS data was taken from the RENGEO's IG, which have a temporal resolution of 15 and 30 seconds, since 1996. The stations are selected based on an influence area with a GPS radius of 10km for each one, having 27 geodetic GPS receiver points located in three regions of Ecuador, distributed as follows 22% in the highlands, 70% on the Coast and 7% in the Amazon. Regarding the automatic weather stations, 20 stations from INAMHI and 1 station from FONAG were selected. These stations were distributed this way 24% on the Coast, 71% in the highlands and 5% in the Amazon, covering all range of elevations except the temperate one that covers from 1000 to 2000 meters above the sea level.

Finally, it is concluded that this type of studies are representative in the climate regions of Ecuador to determine water vapor with the tropospheric delay of the GPS signal and the data will serve to create an early warning system for intense rain events with sufficient anticipation and temporary resolution.

**KEYWORDS:** Geospatial Analysis, Ecuador, tropospheric delay, GPS, tropospheric water vapor.

## 1. INTRODUCCIÓN

El vapor de agua es un constituyente importante en la atmósfera terrestre y su cuantificación está ligada a estudios para el mejoramiento de pronóstico, estudios del clima, meteorología y química atmosférica, siendo además considerado como el principal gas de efecto invernadero que es el factor principal en el balance energético del planeta Tierra (Cioce, Hoyer, Wildermann, Royero, & Díaz, 2011).

Las formas típicas de medir vapor de agua troposférico incluyen el lanzamiento de costosas radiosondas, adquisición de datos satelitales, radiómetros de microondas (WVR), fotómetros solares, lidar (radar láser) e imprecisas salidas de modelos, por ende, es una variable poco caracterizada en Ecuador (Ortíz & Valladolid, 2013).

Por otro lado, debido a las diversas aplicaciones netamente geodésicas, el término GPS (*Global Positioning System*) es usado con más frecuencia. Es un sistema de posicionamiento global que se utiliza para rastreo, ubicación de vehículos en ruta, barcos, etc., siendo esta aplicación, una pequeña parte de su uso, tarea que cumple con alta precisión y confiabilidad (Fernández, Meza, & Natali, 2009). Es así que, gracias a su versatilidad y características, muchas disciplinas como las ciencias de la atmósfera, son beneficiadas con las aplicaciones GPS ya que mejoran la cobertura espacial y temporal ofreciendo a su vez resultados sobre variables atmosféricas en tiempo real que favorece a la generación de modelos atmosféricos, climáticos, entre otros (Cioce et al., 2011).

Para la estimación de vapor de agua, es necesario conocer que la troposfera es la primera capa de la atmósfera terrestre en contacto con la superficie terrestre, la constituye una zona neutra que hace que la propagación de la señal de GPS dependa primordialmente de la cantidad de vapor de agua, presión atmosférica y temperatura. De esta manera, y sumando datos de temperatura, se puede determinar la cantidad de vapor de agua troposférico por ser causante del retraso en la señal GPS, conocido como retraso troposférico (Suárez, 2009).

La presente investigación tiene como propósito analizar geoespacialmente la distribución de las estaciones meteorológicas y receptores GPS sobre el Ecuador e identificar al menos tres zonas con distinta climatología que en un futuro pueda ser considerada como una novel técnica para la determinación de vapor de agua troposférico utilizando datos de retraso de la señal GPS. Con esta información se espera que, con estudios posteriores y gracias a las nuevas teorías de transiciones de fase vinculadas, se pueda finalmente detectar la aparición de lluvia intensa (Peters & Neeelin, 2006).

Para llevar a cabo este objetivo, se utilizaron los datos de GPS del Instituto Geofísico (IG) de la Escuela Politécnica Nacional (EPN) que cuenta con la Red Nacional de Geodesia (RENGEO), la cual está constituida por receptores GPS que operan de manera continua. El IG ha instalado y mantiene una red de receptores GPS/GNSS de alta calidad que permiten estudiar movimientos milimétricos de las placas tectónicas en el territorio ecuatoriano, siendo 85 estaciones con operación permanente, de las cuales 30 están ubicadas en los volcanes potencialmente activos y las restantes en fallas activas (RENGEO, 2018).

Asimismo, se utilizarán los datos de precipitación, temperatura media y presión atmosférica del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), Fondo para la Protección del Agua (FONAG) y Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento de Quito (EPMAPS).

Con los datos logrados, se determinarán las zonas de estudio plausibles para llevar a cabo esta investigación. Es decir, aquellos puntos en los cuales se cuenta tanto con datos GPS como de estaciones meteorológicas a una distancia no mayor a 10 Km. Finalmente, se presentará un algoritmo en donde se podrá dar validez de la estimación de vapor de agua troposférico con datos de GPS. Esta investigación será la base para estudios futuros de Alerta Temprana de lluvia intensa, que se lleva a cabo a través de una Tesis Doctoral, auspiciada por la Universidad Politécnica Salesiana (UPS), Escuela Politécnica Nacional (EPN) e Instituto de Investigación para el Desarrollo (IRD), que busca generar un sistema que permita estar preparados frente a fenómenos de lluvia extrema que vulneren: sistemas productivos agropecuarios, infraestructura urbana, provoquen deslizamientos, inundaciones, entre otros.



## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo General**

- Analizar espacialmente la distribución de las estaciones meteorológicas y receptores GPS para la determinación de la cantidad de vapor de agua troposférico utilizando datos de GPS geodésicos sobre tres zonas distintas del Ecuador Continental.

### **2.2. Objetivos Específicos**

- Identificar las estaciones meteorológicas con datos horarios de precipitación, temperatura y presión atmosférica disponibles en el país; así como receptores geodésicos GPS.
- Realizar el análisis geoespacial de la distribución de las estaciones con el fin de identificar las aptas para la determinación de vapor de agua troposférico.
- Presentar el modelo de estimación de vapor de agua en función del retraso troposférico de la señal GPS.

### **3. MARCO TEÓRICO**

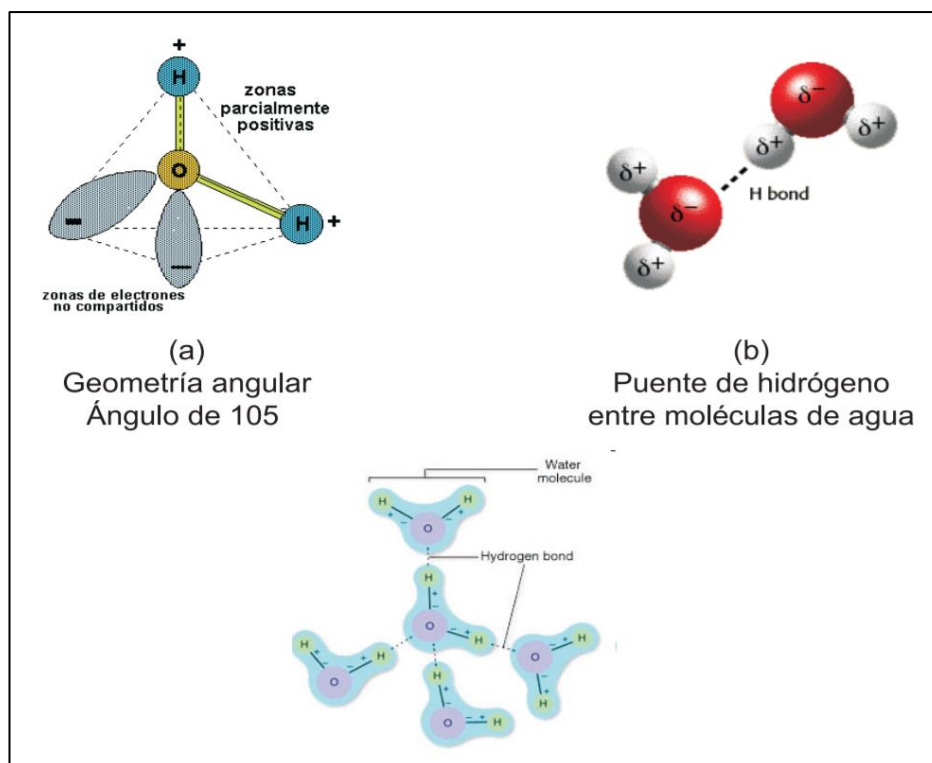
El presente capítulo abarca los conceptos relacionados al tema, para una mejor comprensión acerca de la importancia del desarrollo de este trabajo experimental.

#### **3.1 El agua y su ciclo hidrológico**

El agua está constituida por dos de los elementos que más abundan en la superficie terrestre; estructurada por dos moléculas de hidrógeno y una de oxígeno (Ver Figura 1); además el agua es considerada el elemento más importante del planeta Tierra. Según su mineralogía se clasifica en dos, agua dulce y agua salada (Carbajal Azcona A & Gonzales Fernandez M, 2013).

Las fuentes de agua dulce en la actualidad son un recurso escaso y amenazado debido al cambio climático que experimentamos hoy en día, es así que según Toledo (2002) señala. “Que de acuerdo con los estudios sobre los balances hídricos del planeta solamente el 0.007% de las aguas dulces se encuentran realmente disponibles a todos los usos humanos en forma directa”. Muestra una perspectiva clara de su grado de vulnerabilidad como recurso natural ya que para el 2025 más de las dos terceras partes de la población sufrirá problemas con respecto a este recurso.

Por ello es importante incluir en las principales agendas de los países que en conjunto con sus gobernadores, alcaldes, ministerios, secretarías y población en general se contribuya con el cuidado del recurso hídrico para plantear alternativas que permitan mantener los diferentes ecosistemas en equilibrio.



*Figura 1* Estructura del Agua

Fuente: (Carbajal Azcona A & Gonzales Fernandez M, 2013)

Ante la presencia de frecuentes precipitaciones se desencadenan procesos y ciclos hidrológicos continuos favoreciendo así el desarrollo de la vida (Amaya, 2002). Éstos se producen en un sistema, que a nivel de la superficie terrestre movilizan elementos naturales tales como el Nitrógeno, Fósforo, Agua, Carbono, Hidrógeno, Calcio, Sodio y otros elementos que interaccionan entre los seres vivos y el entorno que se desenvuelven intercambiando energía (Amaya, 2002).

Este ciclo se produce en tres estratos del planeta tierra, la atmósfera que es la capa gaseosa en el que se encuentra la tierra, la litosfera que es la superficie sólida que cubre al globo terráqueo y la hidrósfera conformada por cuerpos de agua que envuelve a la superficie del planeta, iniciando en los mares que ocupan el 70 % de la superficie del

planeta. De este fenómeno natural producen tres eventos importantes llamados evaporación, condensación y precipitación (Ver Figura 2) (Auge, 2007).

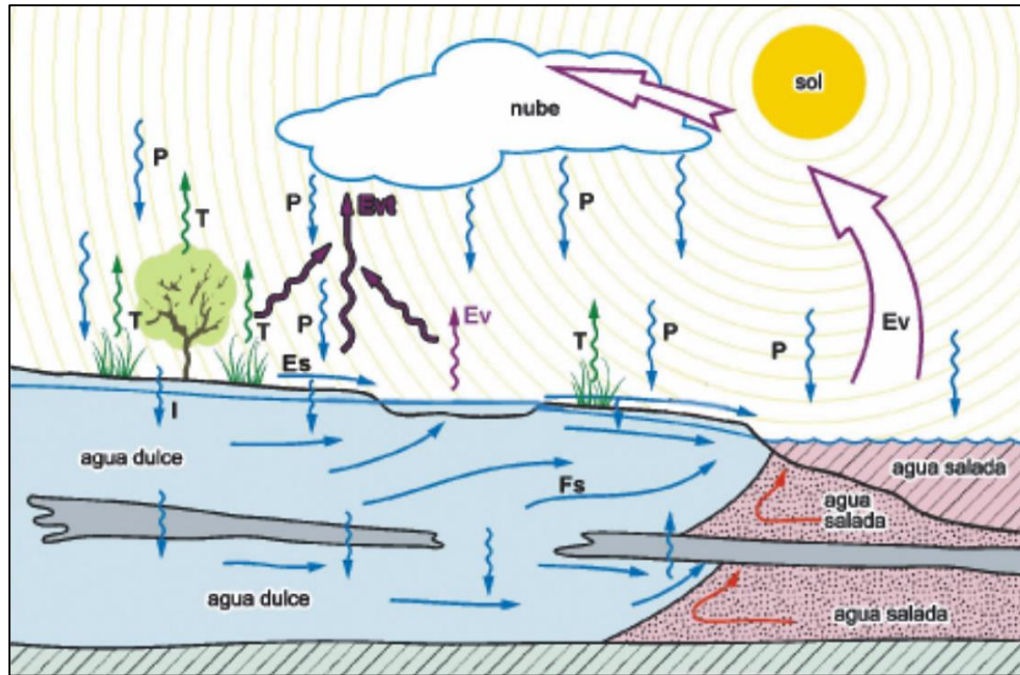


Figura 2 Ciclo Hidrológico  
Fuente: (Auge, 2007)

### 3.1.2 Fases del agua

La evaporación es un proceso físico en el cual el agua sufre un cambio de un estado líquido a un estado gaseoso proporcionando un flujo de vapor hacia la atmósfera (Ver Figura 3), este fenómeno se produce cuando los rayos solares calientan las partículas de agua provocando movimientos de dichas partículas que se desprenden desde la superficie hacia la atmósfera. Los factores que intervienen para la aceleración de la evaporación son la temperatura del aire, la velocidad del viento y la tensión de vapor o humedad relativa que en conjunto miden la cantidad de vapor que puede llegar a saturar la atmósfera. Hämmerly (2001) señala. “La diferencia entre la cantidad de

moléculas que abandonan el líquido y la cantidad de moléculas que vuelven a él, marca el carácter global del fenómeno”.

Por otro lado, la condensación es uno de los fenómenos físicos de la naturaleza en donde el agua al ascender hacia la atmósfera por el proceso de la evaporación, llega a un punto en el que intercambia energía con el ambiente y a su vez pierde calor provocando que las moléculas del agua se enfríen y pasen de un estado gaseoso a un estado líquido.

Finalmente, se la precipitación a la cantidad de agua que cae a la superficie terrestre, ya sea en estado líquido (llovizna y lluvia) o en estado sólido (escarcha, nieve, granizo). Este proceso meteorológico es de gran importancia en el ciclo del agua y en el desarrollo de la vida, además es responsable de depositar la mayor parte del agua dulce en el planeta. Las precipitaciones se refieren a partículas líquidas o sólidas procedentes de las nubes que llegan a la superficie terrestre, cuando estas no alcanzan la superficie terrestre debido a que se evaporan antes de llegar, toma el nombre de virga (UDEP 2015).

La formación de las precipitaciones requiere de la elevación de una masa de agua en la atmósfera de tal forma que se enfríe y parte de su humedad se condense. Hay tres tipos de precipitaciones: las precipitaciones convectivas que se refieren al movimiento ascendente de la masa de aire debido al calentamiento del suelo por radiación solar, formando así las nubes muy altas; precipitaciones orográficas que se producen porque las montañas tienen la capacidad de elevar el aire produciendo lluvias, y precipitaciones

ciclónicas que ocurren cuando hay una elevación de masa de aire caliente sobre una masa de aire frío donde se condensan produciéndose precipitaciones (UDC, 2014).

Se conoce que, para la formación de la precipitación, la superficie terrestre debe calentarse y esto se da por la variación de la radiación solar recibida, por ende, la humedad siempre va a estar presente en la atmósfera y para que ocurran precipitaciones se necesita enfriar el aire para alcanzar o estar cerca al punto de saturación. La saturación es una condición esencial para activar la condensación (Ordoñez, 2011).

### **3.2 Vapor de agua y vapor de agua troposférico**

El vapor de agua, en general, es un gas de presencia global que se obtiene de los diferentes procesos como la ebullición, de la evaporación del agua líquida o por la sublimación del hielo (Ver Figura 3). Este proceso que se da tanto en aguas continentales como aguas marinas es clave en el transporte de calor a diferentes estratos del planeta y la regulación térmica del mismo. La cantidad de agua que regresa a la atmósfera por evaporación y transpiración conocida también como transpiración real, se refiere a la suma de las cantidades de vapor de agua que son evaporadas por el suelo y transpiradas por las plantas en un lapso de tiempo determinado, considerando las condiciones meteorológicas y la humedad del suelo (Raya, 2003).

Raya (2003) señala. “El vapor de agua se difunde a la atmósfera por procesos turbulentos, donde su concentración varía desde un 5% de volumen de aire cerca del suelo en las regiones ecuatoriales hasta casi desaparecer por encima de los 10 a 12 km de altitud”.

Según Cioce et al. (2011) la energía solar hace contacto con el vapor de agua y una parte de ella es reflejada hacia el espacio atravesando las demás capas de la atmósfera, la otra parte es absorbida por dicho gas y el resto llega a la superficie terrestre. Por eso se dice que el vapor de agua es un gas de efecto invernadero, ya que esta energía es aprovechada, transformada y devuelta como energía térmica, proceso considerado como natural ya que ayuda a mantener la temperatura del planeta estable permitiendo el perfecto desarrollo tanto químico, físico y biológico en el entorno. Si hubieran altas concentraciones de vapor de agua en la tropósfera u otros gases de efecto invernadero, se impedirían la salida de la energía térmica como los rayos infrarrojos y el incremento de la temperatura sería evidente (Cioce et al., 2011).

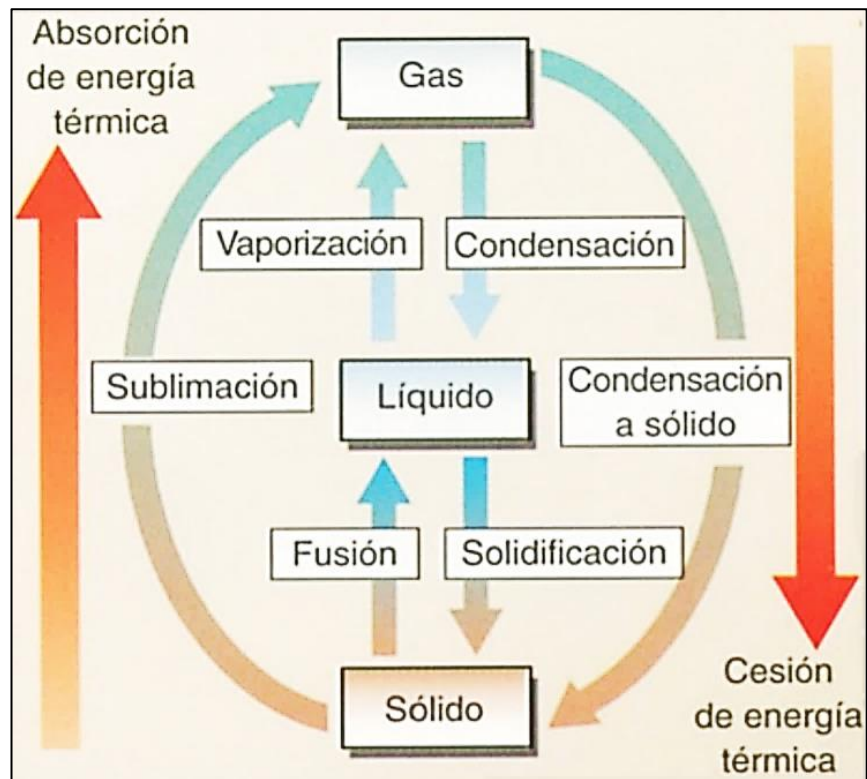


Figura 3 Vapor de Agua (GAS) – Fases del agua  
Fuente: (Concha Valenzuela, 2016)

El vapor de agua troposférico también es conocido como vapor de agua precipitable (*Total Precipitable Water TPW*), vapor de agua integrado en columna. La tropósfera es una de las capas gaseosas que envuelve a la tierra que se extiende aproximadamente unos 18 km de altura en el ecuador, 13 km en latitudes medias y 8 km sobre los polos, haciendo referencia que esta capa se forman las nubes y todos los fenómenos atmosféricos.

Sin embargo, el vapor de agua troposférico TPW realmente es una variable tomada de la señal de microonda, que representa la profundidad en milímetros de agua líquida que se acumularía, si todo el vapor de agua contenido en un cilindro hipotético colocado sobre un punto se condensaría (MetEd, 2008), ya que los instrumentos de microondas son capaces de detectar la energía que pasa a través de casi todas las nubes, desde la superficie del mar hasta la cima de la tropósfera (Bidegaing, M. Necco, G. Pisciotano, 2011).

### **3.2.1 Sistemas de detección de vapor de agua**

Dada la importancia del vapor de agua, se han generado algunos sistemas de detección como:

- **Datos satelitales con productos microondas:** Poseen alta precisión y trabajan en tiempo real. Son utilizados solo sobre agua (MetEd, 2008).



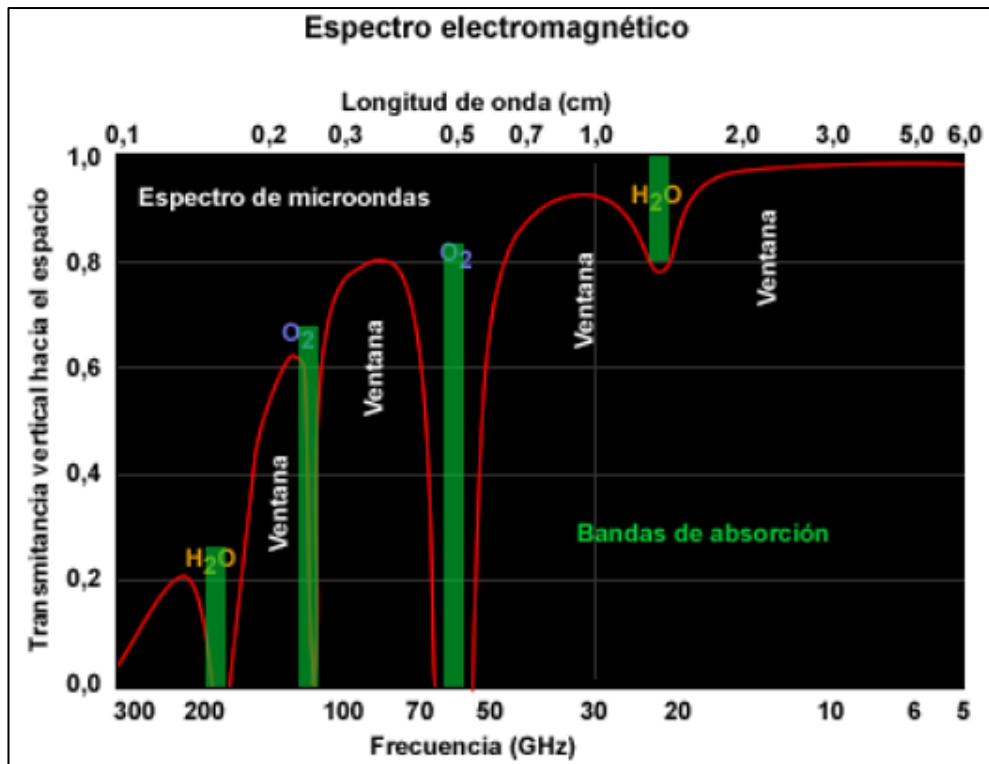


Figura 4 Canales de microondas eligen frecuencias con diferentes capacidades de detección

Fuente: (MetEd, 2018)

- **Radiosondas:** Poseen alta precisión, determinan un solo dato por día si las condiciones meteorológicas lo permiten son muy costosos (Fernández, et al., 2009).



*Figura 5* Radiosonda  
Fuente: (Admin, 2011)

- **Radiómetros:** Miden de manera continua la cantidad de vapor de agua conforme a la trayectoria de la señal, además sufren ciertas afectaciones ante la presencia de moléculas de agua, otorgando estimaciones inciertas o en algunos casos erróneas (Fernández et al., 2009).



*Figura 6 Radiómetro MFRSR*  
Fuente: (Priego De Los Santos, 2012)

- **Modelos:** Se los puede adquirir libremente son muy imprecisos sobre tierra, sobre todo cuando la topografía es muy escarpada (Zhang et al., 2008).
- **GPS:** (*Global Positioning System*) Poseen alta precisión, se pueden obtener datos en tiempo real, sus costos son variados y se puede tomar la data en cualquier condición meteorológica.

### **3.3 Precipitaciones extremas y vapor de agua troposférico: últimas investigaciones**

La lluvia proviene de un sistema dinámico complejo que implica procesos microfísicos de nucleación y coalescencia, inmersos en una atmósfera gobernada por ecuaciones no lineales sin solución analítica (Gamache & Houze, 1983). Dada la importancia de la lluvia en las actividades humanas, una red meteorológica global que incluye datos satelitales, junto con modelos de circulación global y super-computadoras han permitido predecirlo. Sin embargo, la lluvia extrema tiene comportamientos y causas que van más allá de los análisis convencionales.

Generalmente, la lluvia se caracteriza por pocos eventos importantes que liberan una enorme cantidad lluvia en pocos eventos extremos; siendo la lluvia una distribución no paramétrica por excelencia (Zubieta, Saavedra, Silva, & Giráldez, 2017), (Espinoza et al., 2012) y hoy en día, es considerado como uno de los eventos más impredecibles del sistema climático. Más aún, en la región de los Andes tropicales, la alta variabilidad, se debe a la influencia dominante de los procesos de mesoescala (Buytaert et al., 2006) ya que la interferencia de los Andes por el movimiento de columnas convectivas genera complejos patrones espaciales en términos de precipitación (Villacís et al., 2008).

Sin embargo, estudios termodinámicos recientes (Selvam, 2017) (Neelin et al., 2009), (Peters & Christensen, 2002); han demostrado que las fuertes lluvias tienen algunos comportamientos regulares consistentes con la teoría de las transiciones de fase continuas y la criticidad autoorganizada (SOC), caracterizada por la aparición leyes de potencia (conocidas también como distribuciones sin escala o de comportamiento

fractal). Así, se argumenta que cuando se alcanza un valor crítico del vapor de agua, el sistema genera una transición de fase continua hacia un régimen de precipitación intensa (Neelin et al., 2009).

La mayoría de estos estudios se realizaron sobre el mar (los datos del vapor de agua se superponen con el albedo terrestre); ya que como se mencionó anteriormente las mediciones sobre tierra, donde la gran variedad de tipos de suelo, aerosoles, vientos y topografía representan un gran reto, son caras y escasas, o —en su defecto— muy imprecisas como las salidas de modelos (Businger et al., 1996), y (Jade & Vijayan, 2008).

### **3.4 Estimación de vapor de agua a través del retraso troposférico del GPS**

A continuación, se presentará en detalle cómo se estima la cantidad de vapor de agua troposférico en tiempo real a través del uso de GPS.

#### **3.4.1 GPS (*Global Positioning System*)**

GPS (*Global Positioning System*), Sistema de Posicionamiento Global, es un sistema que tiene por objetivo determinar las coordenadas espaciales de puntos respecto de un sistema de referencia mundial, con gran precisión (Huerta Eduardo; Mangiaterra Aldo; Noguera Gustavo., 2005). Los puntos a determinar pueden estar ubicados a nivel de todo el globo terrestre; pueden estar estáticos o en movimiento, y los datos pueden ser tomados en todo el transcurso del día, y con precios accesibles. Estas características, lo hacen un sistema sumamente deseable para cualquier tipo de medición.

Huerta *et al.* (2005) manifiestan que el sistema de obtención de coordenadas se basa en la determinación simultánea de las distancias a cuatro satélites (como mínimo) desde coordenadas conocidas. Estas señales son captadas por receptores especializados que interpretan y dan una respuesta en coordenadas numéricas del sistema Geográfico o UTM (*Universal Transversal de Mercator*), que es el sistema de coordenadas más utilizado.

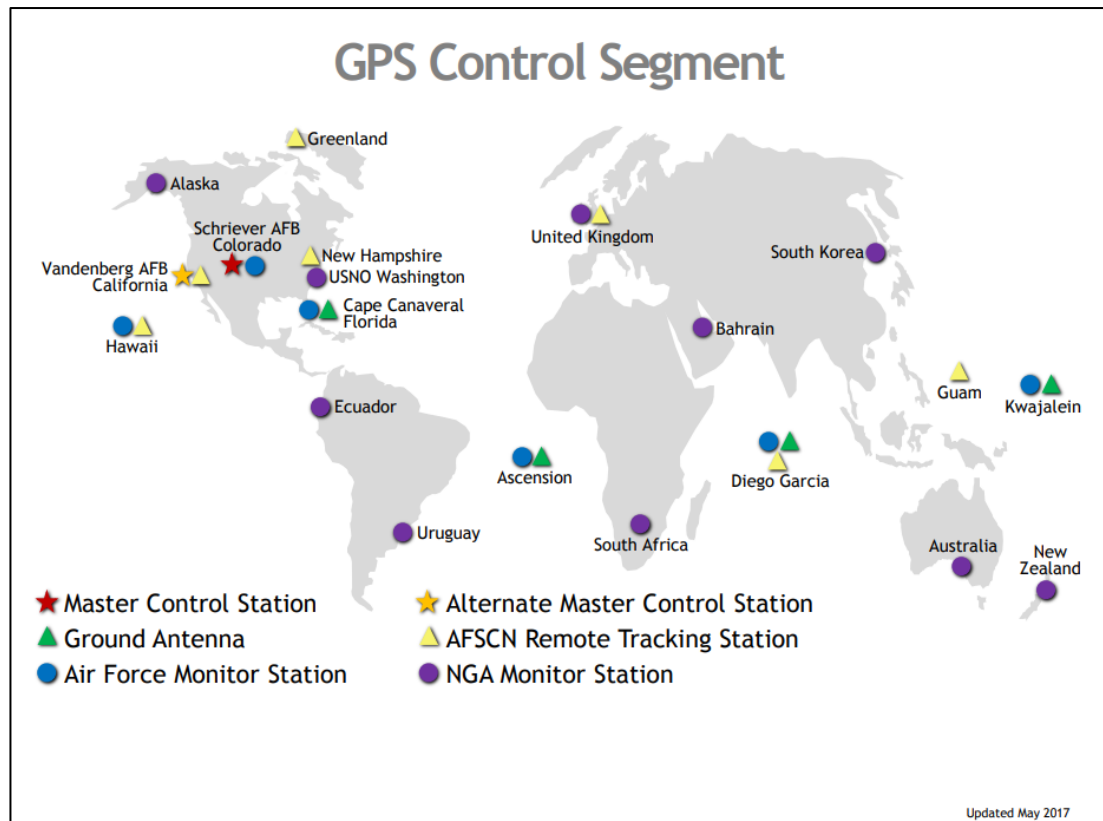
El sistema de posicionamiento global está conformado por un conjunto de satélites de 24 estaciones que orbitan y emiten datos de posicionamiento de GPS, en un principio, este sistema fue pensado para usos militares pero debido a sus grandes aplicaciones y desarrollo en la actualidad tiene usos civiles. Los sistemas GPS tienen una gran funcionalidad ya que operan a cualquier hora del día, con cualquier condición meteorológica y en cualquier ubicación del globo terráqueo (Basantes, 2016).

### **3.4.2 Componentes de sistema de GPS**

Todo sistema GPS está compuesto por tres componentes fundamentales que son:

#### **3.4.2.1 Segmento de control**

Los sistemas de control llamado OCS (*Operational Control Segment*) están estructurados por estaciones de monitoreo que permiten de manera constante analizar, determinar y predecir orbitas, así como los relojes abordo; los puestos de control son aquellos que me permiten sincronizar los relojes de los satélites con el GPS a su tiempo definido y una serie de estaciones de enlace ascendente que me permite transferir la información procesada a cada satélite (Huerta Eduardo; Mangiaterra Aldo; Noguera Gustavo., 2005).



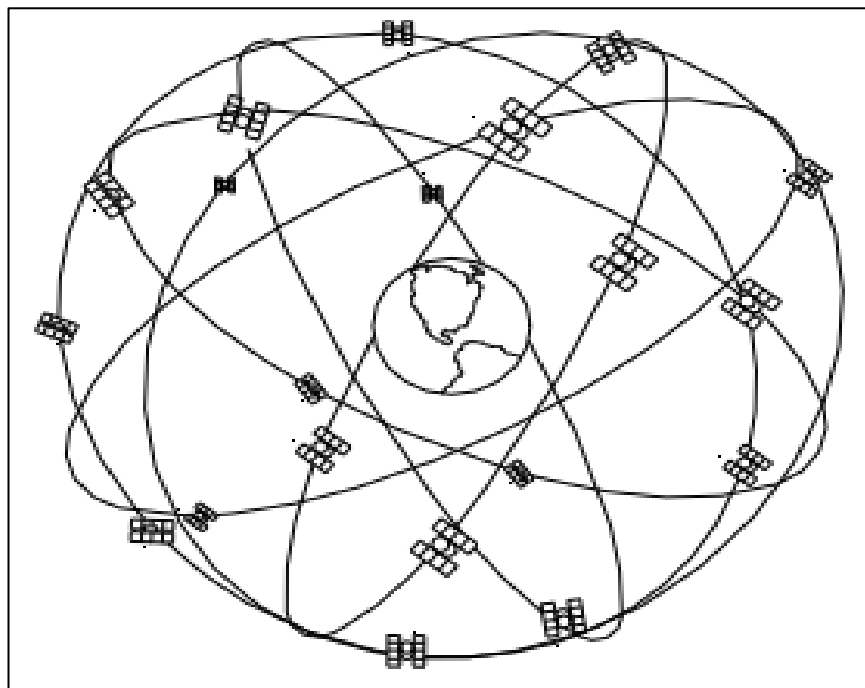
*Figura 7* Estaciones de control que permiten el funcionamiento global de los GPS  
Fuente: (GPS.gov, 2017)

El segmento de control está conformada por 10 estaciones entrelazadas entre sí que cumplen papeles únicos (Ver Figura 7), estas se ubican en: Colorado Springs (EUA), Isla Ascensión (Atlántico Sur), Diego García (Índico), Kwajalein (Pacífico Occidental), Hawaii (Pacífico Oriental), Quito (Ecuador), Buenos Aires (Argentina), Hermitage (Inglaterra), Bahrein (Golfo Pérsico) y Smithfield (Australia) (Huerta Eduardo; Mangiaterra Aldo; Noguera Gustavo., 2005).

### 3.4.2.2 Segmento espacial

El segmento espacial está conformado por los satélites que emiten la información que posee la ubicación espacial y temporal a los otros segmentos mencionados

anteriormente (Ver Figura 8) (Gómez, 2012). Al principio de la década de los 90 fue completado el conjunto de satélites y adquirió el nombre de constelación, compuesta por 24 satélites que circulan en 6 orbitas del planeta de manera constante con un grado de inclinación de  $55^{\circ}$  con respecto a la línea ecuatorial, se encontraba a una distancia de 20180 km de altura con un periodo de rotación de 12 horas, también existen satélites que se encuentran en órbita, pero no en funcionamiento y solo sirve como material de reemplazo. Con el avance tecnológico se adicionó los satélites Bloques IIR y IIF dando como resultado para principios del 2005 29 satélites en órbita distribuidos en los 6 planos orbitales (Huerta Eduardo; Mangiaterra Aldo; Noguera Gustavo., 2005).



*Figura 8* Segmento Espacial

Fuente: (Huerta Eduardo; Mangiaterra Aldo; Noguera Gustavo., 2005)



Las principales constelaciones de satélites que existen en la actualidad son: GPS, GLONASS, Galileo, Sistemas regionales en los cuales tenemos Beidou y Compass, QZSS y IRNSS (Gómez, 2012).

#### **3.4.2.3 Segmento usuario**

El segmento de usuario está conformado por las herramientas que utilizamos los usuarios para captar y procesar la señal emitida por los satélites, al procesar la información se puede calcular la longitud, latitud, altitud y tiempo. El receptor debe cumplir con algunos requisitos como por ejemplo la determinación y el análisis de los códigos de cada satélite, la identificación de la distancia, la determinación de la posición y velocidad, validación de resultados y las aplicaciones correctivas como al reloj, las correcciones ionosféricas y las correcciones troposféricas (Henao Melo, 2014).

El sistema básicamente está compuesto por una antena y un receptor que están conectados por cables de manera simultánea, las coordenadas que se calculan corresponden al centro radioeléctrico de la antena, por su parte el receptor consta de 4 canales que permite procesar la señal de los satélites, un microprocesador con el software adecuado que se encuentra en la parte interna del componente que calcula las coordenadas de la antena y la velocidad y el acimut si el aparato está en movimiento (Huerta Eduardo; Mangiaterra Aldo; Noguera Gustavo., 2005).

### **3.4.3 La señal GPS**

Los satélites pueden transmitir señales en ambas frecuencias, estas señales son; las señales de navegación (códigos), y los datos de navegación y sistema (mensaje). El conjunto completo de estos datos se subdivide en 5 partes, cada uno cuenta con una duración de seis segundos, haciendo que este conjunto tenga un tiempo total de 30 segundos. En estos se pueden encontrar:

- Subconjunto 1: Datos de parámetros de los relojes de los distintos satélites.
- Subconjuntos 2 y 3: Datos de las efemérides transmitidas.
- Subconjuntos 4 y 5: Datos de almanaque y datos Ionosféricos.

Existe dos tipos de códigos que modulan la señal; primero, el código C/A denominado también como servicio estándar de determinación de la posición (SPS: Standar Position Service), es aquel que modula a una frecuencia de 1,023 MHz ( $10.23/10$ ), que tiene una duración de un milisegundo y la longitud de onda es de aproximadamente 300 m, este código se transmite solo por medio de la frecuencia L1; segundo, el código P o código de Precisión, modula a una frecuencia de 10.23 MHz, tiene una secuencia de 267 días y una longitud de onda de 29.31 cm. Por otro lado, a los distintos satélites se les ha otorgado porciones de siete días (KOLLNER LABRAÑA & CIA. LTDA, s.f.).

### **3.4.4 Funcionamiento de los GPS**

El sistema GPS se basa principalmente en la trilateración con los satélites, es por ello que los receptores miden la distancia con la velocidad de la luz ya que las señales de radio viajan a dicha velocidad; se usan relojes precisos y cuatro satélites para la

medición. Además de la distancia, es necesario conocer la posición de los satélites para cada instante, posterior a conocer tanto la distancia como la posición se corrigen los errores atmosféricos, obteniendo una solución navegada (KOLLNER LABRAÑA & CIA. LTDA, s.f.).

### **3.4.5 Fuentes de error**

Los resultados de los GPS siempre están sometidos a fuentes de errores que pueden ser magnificados o minimizados según los equipos que se lleguen a utilizar, el receptor es el encargado de determinar la posición que existe entre su antena y las antenas de los satélites. De acuerdo a la distancia y posicionamiento de los satélites el receptor calcula una posición lo más cercana a la realidad (Franco, 2006).

Existen varios tipos de errores los cuales se los clasifica en tres grupos: Errores relativos al satélite, los errores relativos a la propagación de la señal en el medio, y los errores relativos al receptor.

#### **3.4.5.1 Errores relativos al satélite**

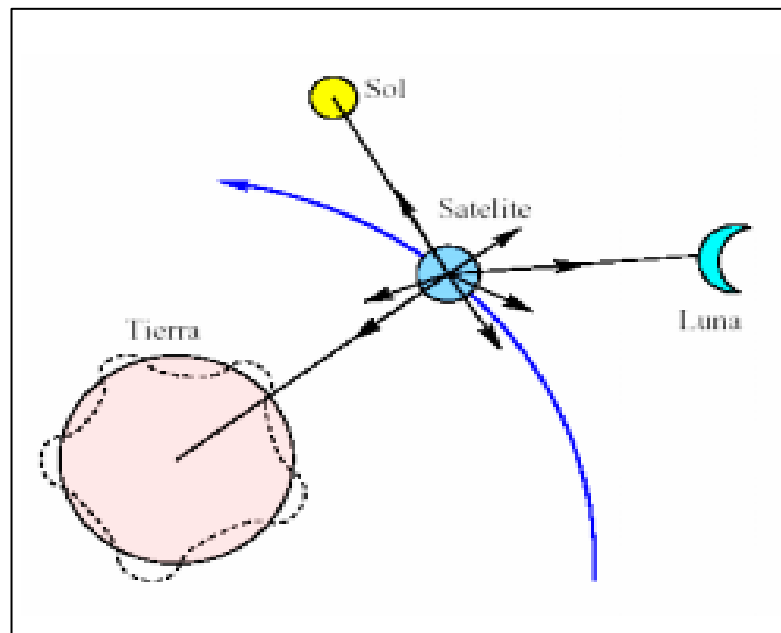
##### **3.4.5.1.1 Error del reloj del satélite**

El error de reloj está asociado principalmente a los materiales que muchos están contruidos, los satélites llevan relojes atómicos con osciladores de cesio o de rubidio dependiendo la función que se requiera, sin embargo, ningún reloj es perfecto ni el atómico que su estimación de error es mínima comparadas con otros modelos (Kenguruka, 2014).

Los errores que se producen en este sistema se puede eliminar mediante correcciones de forma de mensajes de navegación que recibe el receptor que son calculadas frecuentemente por las estaciones (Franco, 2006).

#### 3.4.5.1.2 Errores en los parámetros orbitales

Para establecer su posición, el sistema debe conocer las posiciones de los satélites, los cuales registran y analizan los datos de una posible distancia el cual mediante un tipo de software de alta tecnología se predicen las posiciones orbitales de los satélites, estas son transmitidas por los mensajes de navegación (Ver Figura 9). Este proceso siempre estará asociado a un porcentaje de error ya que es imposible predecir exactamente sus posiciones. Los errores en los parámetros orbitales se pueden corregir analizando las efemérides precisas de los días de las observaciones en las cuales aparecen las verdaderas posiciones de los satélites (Franco, 2006).



*Figura 9 Errores en los parámetros orbitales*  
Fuente: (RIOACHA, 2007)

### 3.4.5.2 Retrasos relativos a la propagación de la señal

#### 3.4.5.2.1 Retraso Ionosférico

La tierra está compuesta de varias capas gaseosas que envuelven al planeta, una de esas es la Ionosfera que se encuentra ubicada a unos 100 y 1000 km de altura sobre la superficie de la tierra, que ioniza las moléculas de gas que a su vez liberan electrones que interfieren con la propagación de ondas, de manera que cada onda se decelera en una proporción inversamente proporcional al cuadrado de la frecuencia (Ver Figura 10) (Reyes, 2009).

Para eliminar este efecto ionosférico comúnmente se utilizan modelos predictivos empíricos para corregirlos, modelando a través del TEC (Total Electrón Content) de acuerdo al tiempo, lugar y dirección. Usando este modelo se puede reducir los efectos de error en un 50 % proporcionando una precisión más alta de datos requeridos (Franco, 2006).

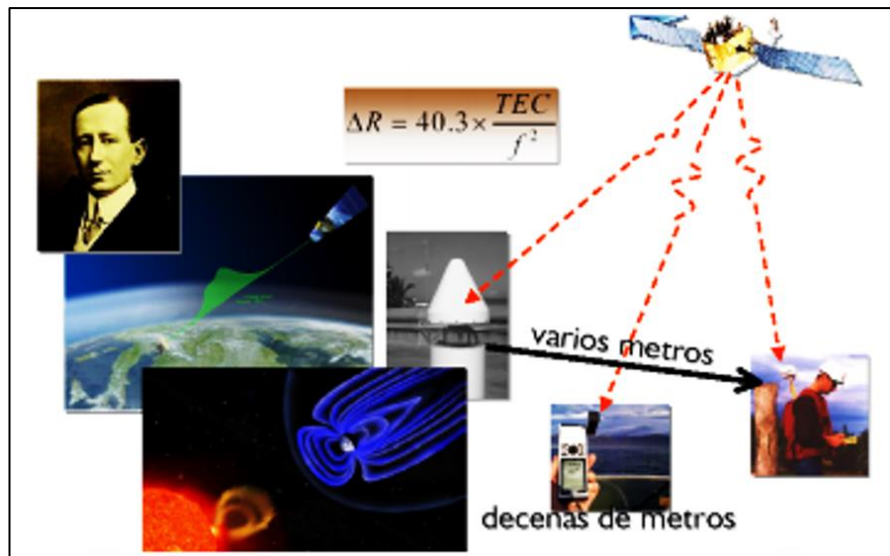


Figura 10 Error Ionosférico  
Fuente: (RIOACHA, 2007)

#### **3.4.5.2.2 Retraso troposférico**

La troposfera es una de las capas más cercanas a la superficie terrestre siendo la primera en interactuar con el medio, está a una altura aproximadamente de 80 km y en los últimos 40km se produce los retardos más significativos. La variación de la refracción depende netamente de la temperatura, presión y nivel de humedad, estos errores se cometen ya que la troposfera afecta a las señales de propagación (Kenguruka, 2014).

El error de retardo troposférico se lo puede minimizar tomando datos de estaciones meteorológicas en el lugar donde se toma la muestra. El retardo que produce estas condiciones descritas anteriormente se pueden evaluar en 1.9-2.5 m en la dirección cenital con un incremento aproximadamente de la cosecante del ángulo de elevación, llegando a ser de 20-28 m a unos 5° (Franco, 2006).

#### **3.4.5.3 Errores relativos al receptor**

##### **3.4.5.3.1 Error en el estacionamiento de la antena**

Estos errores son los menos imperceptibles ya que la antena tiene menor exigencia en estacionamiento siendo muy inferiores a los instrumentos de observaciones clásicas, por ende, no necesitan una alta estabilidad ya que pequeñas vibraciones, torsiones o movimientos no afectan en nada a la transmisión de los satélites (Franco, 2006).

#### **3.4.5.3.2 Error en la manipulación de los equipos**

Los errores de manipulación de equipos se producen cuando el operador no sigue las instrucciones del fabricante o simplemente cuando se procede a trabajar rutinariamente. Los equipos se ajustan de manera a las condiciones que se trabajó de manera constante produciendo un desequilibrio en el equipo, por eso es importante comenzar cuando se haya sincronizado todos los satélites, por lo contrario, solo se estará introduciendo ruido a las observaciones planteadas (Franco, 2006).

#### **3.4.6 Equipos GPS del Mercado**

En la actualidad hay una gran variedad de GPS que oferta el mercado según las necesidades que requiera el usuario, la clasificación puede realizarse en base a muchos criterios como por ejemplo de acuerdo a la arquitectura del proyecto (receptores secuenciales, continuos o múltiplex), según el método de operación (correlación de código o análisis de fase de la portadora), entre otros. De acuerdo a la aplicación se tiene los siguientes receptores (CIAT, 2007).

##### **3.4.6.1 Navegadores Convencionales**

Son receptores con mayor uso por su bajo costo y múltiples aplicaciones. Estos tienen la capacidad de realizar lectura de códigos C/A o señales diferenciales (radio o conexión software) y representar a través de pantallas diversos tipos de cartografías desde las más sencillas (CIAT, 2007).

Además, estos receptores permiten conocer las coordenadas, además de proporcionar la posición geográfica, también indican la elevación por medio de la misma señal de los satélites y algunos modelos tienen también barómetro para

determinar la altura con la presión atmosférica. Las precisiones de este tipo de receptores pueden ir de los 25 m a los 7 m en planimetría sin contar con la disposición selectiva. Una de las ventajas los navegadores convencionales es que el usuario puede manejarlo sin formación específica (CIAT, 2007).

#### **3.4.6.2 Receptores de Código C/A Avanzados**

Estos receptores analizan el código C/A y realizan lecturas de la fase portadora L1 con pocas limitaciones (Ver Figura 11). Sin embargo, se lo puede usar con metodologías diferenciales y son aptos para aplicaciones GIS por la precisión compatible. Además es posible ubicar las coordenadas en el plano de terreno, a través de conexiones con ordenadores portátiles o dispositivos móviles (CIAT, 2007).

Estos receptores presentan la facilidad de contar con las bases de datos en el terreno y conocer la posición en tiempo real, mediante una pantalla a color, en donde se podrá ver la cartografía y acceso a bases de datos asociadas. Es como llevar la versión reducida del GIS al terreno. Su precisión va de 1 a 3 m y las principales marcas de este tipo de receptores son Trimble y Astech que poseen costos medianos (CIAT, 2007).

Las estaciones geodésicas del IG (Instituto Geofísico) de la Escuela Politécnica Nacional, son equipos que poseen doble frecuencia y son modelos Trimble NetRS, NetR8 y NetR9, con los que se trabaja para tomar medidas en intervalos de 15 y 1 segundos para los volcanes y de 30, 1 y 0.2 segundos para estructuras tectónicas (RENGEO, 2018).





*Figura 11 GPS - GIS*  
Fuente: (CX, 2015)

#### **3.4.6.3 Receptores Geodésicos con Medición De Fase Sobre L1**

Estos receptores se caracterizan principalmente debido a que trabajan con la onda portadora L1, acumulan información y permite obtener precisiones relativas centimétricas (distancias de hasta 25 ó 30 km) y submétricas (distancias de hasta 50 km). Además, involucra en cálculo de vectores con evaluación estadística para dar paso al ajuste de redes, a pesar de que actualmente ya se la considera una tecnología vieja (CIAT, 2007).

Muchos de estos receptores son compatibles con los servicios DGPS, que se enfocan en el trabajo referente a la lectura de código mediante la incorporación de una tarjeta electrónica de expansión y la suscripción al sistema. Su precio suele estar en torno a 12.000 dólares (CIAT, 2007).

#### **3.4.6.4 Receptores Geodésicos de Doble Frecuencia**

Estos trabajan con la onda portadora L1 y también con la onda portadora L2, lo cual permite que los errores derivados de la propagación desigual de dicha señal a través de las distintas capas atmosféricas disminuyan y estos pueden resolver un gran número de ambigüedades. Con este tipo de equipos se logra precisiones por debajo del centímetro con post-proceso (10 km), y por debajo del metro con postproceso (500 km). Además, con esta técnica de post-proceso, los receptores bifrecuencia, pueden ser usados con correcciones en tiempo real y por ello es necesario usarlos junto con algoritmos RTK (*Real Time Kinematic*), que permitirán precisiones centimétricas en tiempo real combinados con estaciones de referencia. El precio de un receptor bifrecuencia de última generación está alrededor de 35.000 dólares ya que son muy especiales en tareas de geodesia y topografía que para aplicaciones GIS (CIAT, 2007).

### **3.5 Estimación de la cantidad de vapor de agua a través del retraso de la señal GPS**

Debido a que en esta investigación se ha identificado la necesidad de datos precisos y fiables sobre el vapor de agua. Se utilizará el preciso sistema de Posicionamiento Global GPS, del IG de la EPN.

Las señales de radio de microondas utilizadas por los satélites GPS son retardadas (refractadas) por la atmósfera a medida que se propagan a receptores GPS basados en tierra. Este retardo es proporcional a la cantidad de vapor de agua integrado a lo largo de la trayectoria de la señal vertical. Y la información es comparable y en algunos aspectos superior en calidad y precisión a las mediciones de los radiómetros de vapor de agua en el suelo (Businger et al., 1996), y con una mayor resolución espacial y

temporal proporcionada por las 88 estaciones de la red IG, localizadas en todo el territorio de Ecuador cubriendo diferentes zonas climatológicas: Costa, Sierra y Amazonía.

Frecuentemente el retraso ocasionado por la tropósfera (Zenit Total Delay, ZTD) sobre la determinación de una posición usando GPS, allega hasta los 2.5 metros logrando dividirse en la contribución de una troposfera hidrostática o seca (Zenit Dry Delay, ZDD), que se asimila a un modelo hidrostático el cual explica el 90% del efecto con gran exactitud, y una componente húmeda (*Zenit Wet Delay*, ZWD) que se relaciona al PWV, fuertemente variable e impredecible, y que a su vez explica el 10% del efecto total (Fernández et al., 2009).

La siguiente ecuación que corresponde a la observación básica GPS indica el trayecto que separa el satélite emisor de radio ondas y el receptor en Tierra; Ecuación (1).

$$\Phi_i = \rho + c (\Delta t^s - \Delta t_R) + N\lambda_i + IONO_i + TD + \varepsilon \quad (1)$$

Donde el superíndice  $s$  es el satélite, el subíndice  $i$  es la estación. El vector  $\rho$  indica la distancia geométrica entre satélite y estación, expresado en términos de las coordenadas de ambos. Se agrega una corrección por refracción ya que hay la presencia de un cruce de señal por la ionosfera (IONO) y otra corrección por refracción por el cruce de la señal por la troposfera (*Tropospheric Delay*, TD) (Fernández et al., 2009).

Mediante una caracterización y cuantificación, se tiene que las contribuciones de las componentes a la corrección troposférica total (ZTD), se afirma lo siguiente:

Componente seca (ZDD): Alude al retardo en la radio señal GPS por el cruce de la misma a través de las moléculas de gas que constituyen la troposfera. Además, este gas se encuentra en equilibrio hidrostático. La denominación de esta componente seca proviene del aire seco contribuyendo al retraso hidrostático, cumpliendo la Ecuación (2)

$$ZTD = ZDD + ZWD \quad (2)$$

## **4. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO**

El presente capítulo detalla el área de investigación, delimitación geográfica de la zona de estudio y los factores que la componen.

### **4.1 Ubicación Geográfica y Extensión del Ecuador**

El presente estudio se lleva a cabo en el Ecuador, que se encuentra localizado en la costa noroccidental del Continente Sudamericano, limitando con Colombia al norte y Perú al sur y este. Posee 4 regiones naturales siendo estas; Costa, Sierra, Amazonía e Insular. Las Islas Galápagos de aproximadamente a unos 1000 kilómetros de distancia desde la zona costera (Ver Figura 12) (Instituto Oceanográfico de la Armada [INOCAR], 2012).

El Ecuador continental se sitúa entre los paralelos 01°30' N y 03°23.5' S y los meridianos 75°12' W y 81°00' W. Lo atraviesa la línea ecuatorial conocida también como paralelo 0° o línea equinoccial, precisamente 22 Km al Norte de la ciudad de Quito, capital del Ecuador. Cuenta con las siguientes extensiones: Continental 262.826 Km<sup>2</sup> y la región Insular 7.844 Km<sup>2</sup>, totalizando una extensión territorial de 270.670 km<sup>2</sup> (Instituto Oceanográfico de la Armada [INOCAR], 2012).

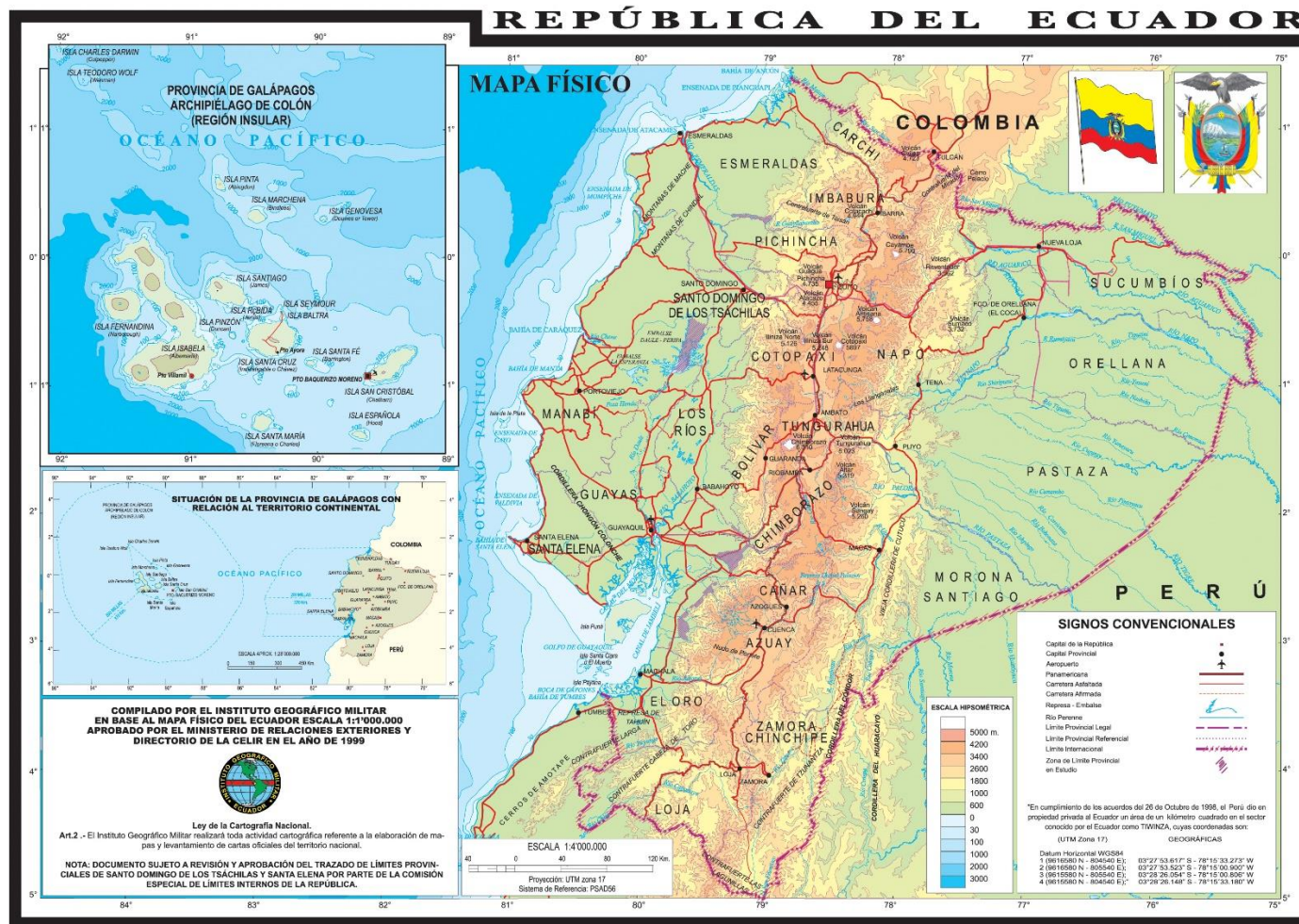


Figura 12 Mapa de la República del Ecuador  
Fuente: (IGM, [Instituto Geofísico Militar], 2018)

## **4.2. Clima**

El clima es el promedio de diversos valores como: precipitación, temperatura, humedad, viento, radiación, nubosidad y presión atmosférica; que son sometidos a medición durante un periodo de tiempo de 30 años, siendo este un periodo de tiempo climático estimado para poder definir el clima en las regiones. Para clasificar el clima se consideran de mayor importancia a dos elementos; precipitación y temperatura.

La Cordillera de los Andes atraviesa al Ecuador de norte a sur, la cual forma una frontera climática es por ello que en Ecuador existen tres regiones climáticas; Costa, Sierra y Amazonía, más las Islas Galápagos (Moya, 2006).

El Clima de la costa se ve influenciado por la Corriente de Humboldt (frio) y la Corriente del Niño (caliente). Además, los vientos juegan un papel importante en la determinación del clima de esta región, los cuales soplan en diferentes direcciones en el mes de febrero (verano) y en el mes de julio (invierno). El clima en las Islas Galápagos es muy parecido. En la Sierra, el clima se ve influenciado por la posición del Sol sobre el planeta durante todo el año y en la Amazonía debido a sus dos zonas climáticas diferentes, presentan un clima muy húmedo (Palacios & Rosero, 2014).

### **4.2.1 Precipitación**

La variedad de condiciones de humedad en los suelos hace que la falta de agua semipermanente o permanente se manifieste en ciertas zonas del Ecuador, mientras que en otras hay un exceso de agua en gran parte del año (Instituto Oceanográfico de la Armada [INOCAR], 2012).

#### **4.2.1.1 Precipitaciones regionales**

Las precipitaciones en el año 2013 fueron irregulares tanto en su distribución espacial como temporal, presentándose registros de incrementos y decrementos porcentuales (Palacios & Rosero, 2014). En la Costa se halla un promedio de 500mm a 2000mm de precipitaciones anuales ya que, ante la presencia de la Corriente caliente del Niño, las precipitaciones son extremas en los meses de febrero y marzo, mientras que en el sur de la Costa Ecuatoriana las precipitaciones son casi escasas, siendo esta zona más seca debido a la corriente de Humboldt.

En la región Sierra se presentan 2 precipitaciones extremas en el año, siendo en los meses de marzo o abril y en octubre; esto se debe a posición del sol que se encuentra perpendicularmente sobre el Ecuador en esos periodos de tiempo.

En el Oriente Ecuatoriano, las precipitaciones varían según sus dos zonas climáticas; En las zonas hasta 1000 metros de altura, las precipitaciones tienen poca influencia por la posición del sol, Se estima que las precipitaciones van de 2000mm hasta 4000mm anualmente. En las zonas mayores a los 1000 metros de altura, se presenta una precipitación extrema en los meses de junio y julio, siendo húmedo todo el año. Por otro lado, en los meses de marzo y abril no se presentan precipitaciones extremas.

Finalmente, en las Islas Galápagos, las precipitaciones anuales son de 500mm, menores a la región Costa; solo en aquellos lugares con mayor altitud reciben mayor cantidad de precipitación. Se presentan precipitaciones extremas en los meses de febrero y marzo (Moya, 2006).



#### **4.2.2 Temperatura**

La temperatura en el Ecuador es influenciada por la altitud que a su vez señala el calentamiento o enfriamiento del aire por el intercambio de calor que se da entre la atmósfera y la tierra (Palacios & Rosero, 2014).

##### **4.2.1.1 Temperatura Regional**

En la región Costa la Temperatura es poco variada durante el año, se estima un valor promedio de 25°C. En la Sierra la temperatura se ve mayormente influenciada por la altitud, teniendo una temperatura promedio de 14°C con variabilidad mínima anual. Por otro lado, en el Oriente Ecuatoriano, La temperatura depende de la altura debido a su clasificación en dos zonas climáticas ya sean menores a 1000 metros o mayores a 1000 y no presenta variaciones durante el año.

En las Islas Galápagos, debido a la influencia marítima, la temperatura oscila por los 23°C (Moya, 2006).

## 5. MATERIALES Y MÉTODOS

En el presente acápite se detalla los materiales y equipos correspondientes a la realización del presente trabajo, incluido la metodología aplicada para el análisis geoespacial de los receptores GPS y estaciones meteorológicas en el Ecuador Continental.

### 5.1 Materiales y Equipos

Tabla 1 *Materiales y equipos utilizados*

MATERIALES	EQUIPOS Y PROGRAMAS
Libreta	Pendrive
Datos receptores GPS IGE - EPN	Software de Sistema de Información Geográfica ArcGIS
Datos estaciones meteorológicas INAMHI	Microsoft Excel
Datos estaciones meteorológicas FONAG	

Elaborado por: (Lema C., 2018).

## **5.2 Métodos**

En la primera parte de la investigación se identificaron los principales actores en la toma de medidas de vapor de agua, precipitación, temperatura y presión atmosférica. A cada actor, gubernamental, municipal o sociedad civil, se entrevistó con el fin de conocer la disponibilidad, calidad, precisión y resolución de los datos, ya que se requería contar con datos infradiarios, y con al menos un año en rango temporal.

Una vez identificados las entidades que podían suministrar data confiable, se solicitaron los datos para realizar el análisis geoespacial para la determinación de vapor de agua troposférico con datos de GPS en el Ecuador. A través de la ubicación de los puntos correspondiente de estaciones meteorológicas y receptores GPS, se identificó las estaciones más cercanas en un mapa de Ecuador. Se trabajó con el programa ArcGIS 10.2.1.

A continuación, se describen cómo se adquirieron los datos logrados en la segunda fase de este estudio:

### **5.2.1. Recolección de datos GPS en IG-EPN (Institituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional)**

Se obtuvieron las ubicaciones geográficas de los receptores GPS, por parte del IG de la Escuela Politécnica Nacional, teniendo un total de 74 receptores con funcionalidad permanente, divididos en tres secciones que se muestra a continuación en la Tabla 2.

Tabla 2 *Datos de latitud y longitud de los receptores GPS en el Ecuador*

**RECEPTORES GPS – IG (EPN)**

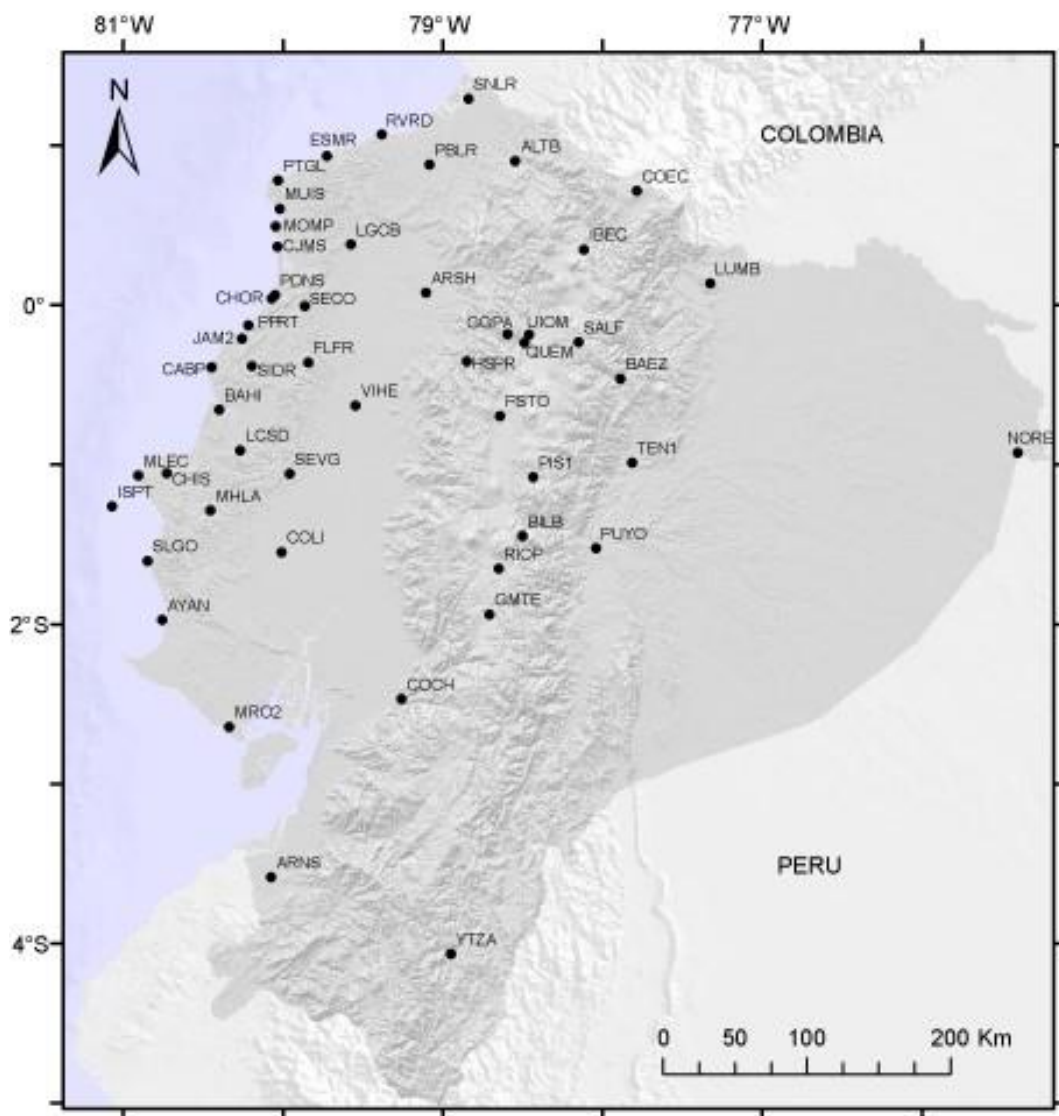
<b>ID</b>	<b>LONGITUD</b>	<b>LATITUD</b>	<b>SITIO</b>
1	-79,09	0,09	ARSH
2	-80,39	-0,65	BAHI
3	-80,42	-0,38	CABP
4	-79,45	-0,27	ECEC
5	-79,84	-0,35	FLFR
6	-79,57	0,38	LGCB
7	-80,04	0,49	MOMP
8	-80,1	-0,69	ONEC
9	-79,99	0,11	PDNS
10	-78,54	0,91	ALTB
11	-76,88	-0,64	AUCA
12	-77,88	-0,45	BAEZ
13	-80,72	-1,05	CHIS
14	-77,78	0,71	COEC
15	-80,01	-1,54	COLI
16	-79,00	-2,88	CUEC
17	-78,61	-0,93	CXEC
18	-78,44	0,31	EPEC
19	-79,72	0,93	ESMR
20	-76,98	-0,46	FOEC
21	-78,70	-1,93	GMTE
22	-79,90	-2,27	GUEC
23	-78,85	-0,35	HSPR
24	-78,11	0,35	IBEC
25	-81,07	-1,26	ISPT
26	-80,62	-1,37	JPJP
27	-79,16	1,09	LPEC
28	-77,32	0,13	LUMB
29	-78,11	-2,3	MAEC
30	-80,76	-1,48	MHLA
31	-80,9	-1,06	MLEC
32	-80,34	-2,64	MRO2
33	-79,62	-2,67	NJEC
34	-77,25	1,21	OVSC
35	-76,49	0,51	PASI
36	-80,42	-1,55	PJEC

37	-78,64	-0,65	PSTO
38	-78,02	-1,49	PUYO
39	-78,49	-0,23	QUEM
40	-77,29	1,39	QUIL
41	-79,46	-1,01	QVEC
42	-78,65	-1,65	RIOP
43	-79,38	1,06	RVRD
44	-80,99	-2,18	SALN
45	-80,03	-0,97	SEVG
46	-80,84	-1,6	SLGO
47	-78,84	1,29	SNLR
48	-77,81	-0,99	TEN1
49	-78,74	1,81	TUCO
50	-78,16	-0,46	ANTN
51	-78,17	-0,49	ANTS
52	-78,5	-1,44	BILB
53	-78,5	-0,67	CAME
54	-78,31	0,31	CCNE
55	-77,91	0,8	CHLS
56	-77,94	0,79	CHLW
57	-78,46	-1,43	CHON
58	-78,77	-1,46	CHZO
59	-78,41	-0,65	CONE
60	-78,36	0,3	CUIC
61	-77,99	0,07	CYMI
62	-78,59	-0,18	GGPA
63	-78,48	-1,49	MAZO
64	-78,45	-0,72	MORU
65	-78,48	-0,67	NAS1
66	-78,43	-1,07	PIS1
67	-78,5	0,02	PLHA
68	-78,91	-0,87	QLTA
69	-78,44	-1,45	RETU
70	-78,45	-0,64	SACH
71	-78,15	-0,23	SALF
72	-78,4	-0,68	TAMB
73	-78,4	-0,64	VC1G
74	-78,41	-1,36	VZCY

Elaborado por: (Lema C., 2018).

La RENGEO (Red Nacional de Geodesia), está constituida por receptores GPS que operan de manera continua. El Instituto Geofísico ha instalado y mantiene una red de receptores GPS/GNSS de alta calidad que permiten estudiar movimientos en el territorio ecuatoriano, siendo 85 estaciones con operación permanente, de las cuales 30 están ubicadas en los volcanes potencialmente activos y el resto en fallas activas (Ver Figura 13).

Las estaciones geodésicas son equipos multifrecuencia, modelos Trimble NetRS, NetR8 y NetR9, que toman medidas en intervalos de 1 y 15 segundos para los volcanes y 30, 1 y 0.2 segundos para las estructuras tectónicas. Los datos llegan al centro de monitoreo, a través de diferentes medios de transmisión: enlaces de radio, internet, microonda y sistema satelital (RENGEO, 2018).



*Figura 13* Distribución de receptores GPS/GNSS de la red de Geodesia para monitoreo de la deformación tectónica  
Fuente: (RENGEO, 2018)

#### 5.2.1.2 Recolección de datos INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología)

Se realizaron las visitas respectivas a las diferentes Instituciones como INAMHI, FONAG Y EMAAPS, para la recopilación de datos de las estaciones meteorológicas

más cercanas a los receptores GPS del IG, que cuenten con la mayor resolución temporal posible de lluvia, temperatura y presión atmosférica.

Inicialmente se visitó el INAMHI, en donde se obtuvo la información necesaria como las coordenadas geográficas de todas las estaciones meteorológicas del INAMHI, siendo un total de 1969 estaciones meteorológicas entre automáticas y convencionales, juntamente con la descripción de cada estación meteorológica, indicando principalmente el tipo de estación, periodicidad y rango temporal. De esta manera se descartó las estaciones que no otorgaban los datos esenciales para la realización experimental como lo son las estaciones pluviométricas, ya que en el presente trabajo se requiere de datos como precipitación, temperatura y presión atmosférica. De igual forma, las estaciones meteorológicas convencionales son descartadas debido a que se necesita una periodicidad mínima de una hora, y al tener periodicidad diaria y mensual dichas estaciones, se opta por trabajar con estaciones meteorológicas automáticas, las cuales cuentan con periodicidad horaria que están operando desde el año 2013, siendo un total de 118 estaciones distribuidas por todo el Ecuador, no se presentan en una tabla dada la gran cantidad de datos.

Cabe indicar que se conoce que el INAMHI realiza lanzamientos de radiosondas en las localidades de Nuevo Rocafuerte y Galápagos, sin embargo, a pesar de que esta información pudo ser valiosa para la validación de la estimación de vapor de agua por GPS, no se utilizó, debido a que sólo se obtenía un dato por día, y no existían datos que coincidieran con las estaciones GPS. Los datos se entregaron luego de seis meses de realizada la solicitud.



### 5.2.1.3 Recolección de Datos del FONAG

Se visitó el FONAG, en donde se obtuvo los datos horarios de precipitación, temperatura y presión atmosférica desde el año 2010 de las estaciones meteorológicas y coordenadas geográficas. Siendo un total de 16 estaciones meteorológicas, que se detalla en la tabla 3.

Tabla 3 *Coordenadas de las estaciones meteorológicas del FONAG*

<b>Código</b>	<b>Nombre</b>	<b>Tipo</b>	<b>Provincia</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>
M5021	Salvefacha Oyacachi	M/Convencional	Napo	9979154.00	821647.00
M5022	Pluviométrica Control Baños	P/Convencional	Napo	9964050.00	817507.00
M5023	Pluviométrica Papallacta	P/Convencional	Napo	9958152.00	818242.00
M5024	El Tambo	P/Convencional	Napo	9958004.00	812125.00
M5025	La Virgen Papallacta	M/Automática	Napo	9963068.00	811859.00
M5026	Cotopaxi Control Norte	M/Automática	Pichincha	9937618.00	784573.00

M5027	Loma Urco Illinizas	M/Automática	Pichincha	9936280.00	760317.00
M5028	Miranda	M/Convencional	Pichincha	9946524.00	790439.00
M5029	El Carmen	M/Convencional	Pichincha	9944491.00	796826.00
M5030	Gordillo Pluviométrica	P/Convencional	Pichincha	9953712.00	794173.00
M5031	Chumillos	M/Automática	Pichincha	9989510.00	810520.00
M5074	Puntas	M/Automática	Pichincha	9981721.00	809389.00
M5075	Itulcachi	M/Automática	Pichincha	9967879.00	804574.00
M5076	Mudadero	P/Automática	Pichincha	9931750.00	789148.00
M5077	REI	P/Automática	Pichincha	9930365.00	757174.00
M5078	Pifo	P/Automática	Pichincha	9973342.00	798647.00

Elaborado por: (Lema C., 2018)

Fuente: (FONAG, 2018)

Para el desarrollo del trabajo se realizó una selección de igual forma que se aplicó para las estaciones meteorológicas del INAMHI, considerando únicamente a las estaciones meteorológicas automáticas. Siendo un total de 6 estaciones meteorológicas automáticas. Los datos se entregaron después de cuatro meses de la solicitud.

#### **5.2.1.4 Recolección de datos del EPMAPS**

Finalmente, el EPMAPS, no contó con la información que se necesita, ya que las estaciones meteorológicas están en mantenimiento, la información está desactualizada y la disposición de datos cuentan con un rango temporal hasta el año 2010. Por este motivo se descarta la posibilidad de trabajar con esas estaciones meteorológicas de esta Institución.

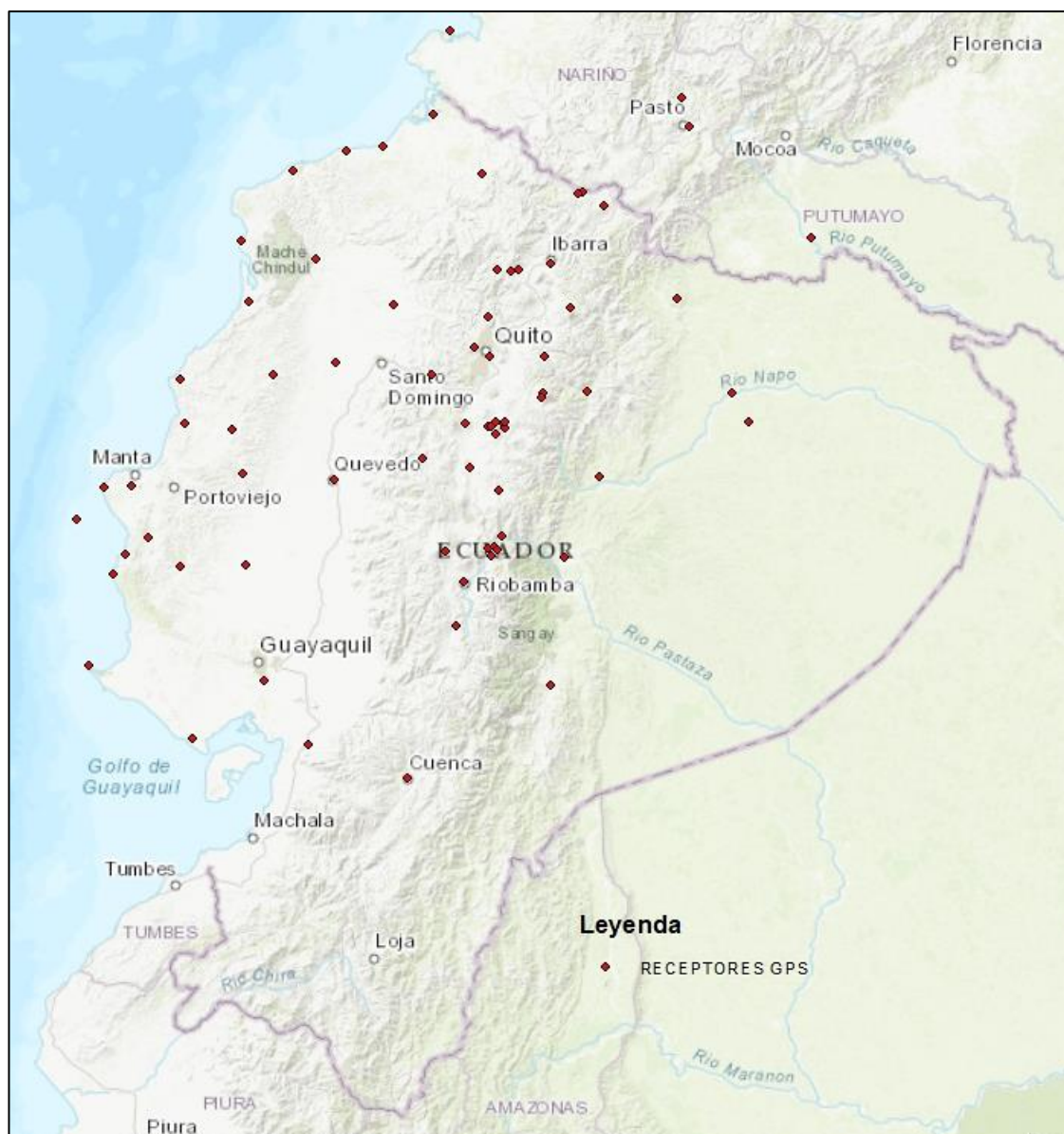
## **6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **6.1 Análisis de resultados**

Una vez terminada la fase de recolección de datos en cuanto a datos de estaciones GPS, datos de precipitación, temperatura y presión atmosférica tanto del IG, INAMHI como del FONAG, se busca realizar una selección las estaciones meteorológicas, con el objetivo de buscar zonas representativas de la climatología ecuatoriana para la posterior realización de la estimación de vapor de agua y lluvia intensa en estudios posteriores. Para la realización de la primera selección de las estaciones se utilizaron los siguientes criterios:

- Los datos debían tener resolución infra diaria, preferentemente horaria, ya que como el objetivo de las futuras investigaciones es obtener un predictor de lluvia intensa y éstos son eventos que generalmente duran pocas horas, idealmente es necesario contar con esta resolución.
- Los datos debían tener más del 75% de los datos para evitar sesgos por datos nulos debido a fallas en los equipos, apagones u otros incidentes que afectarían en el correcto análisis e interpretación de las series temporales.

En la Figura 14, se encuentran ubicados los receptores GPS, que cumplían con las características deseadas, ya que cuentan con una resolución horaria. Para definir su ubicación en el mapa del Ecuador se utilizó ArcGIS 10.2.1. Como se aprecia, la mayoría de las estaciones se encuentran muy cercanas a los volcanes ya que son lugares con alto interés científico para las investigaciones del IG.



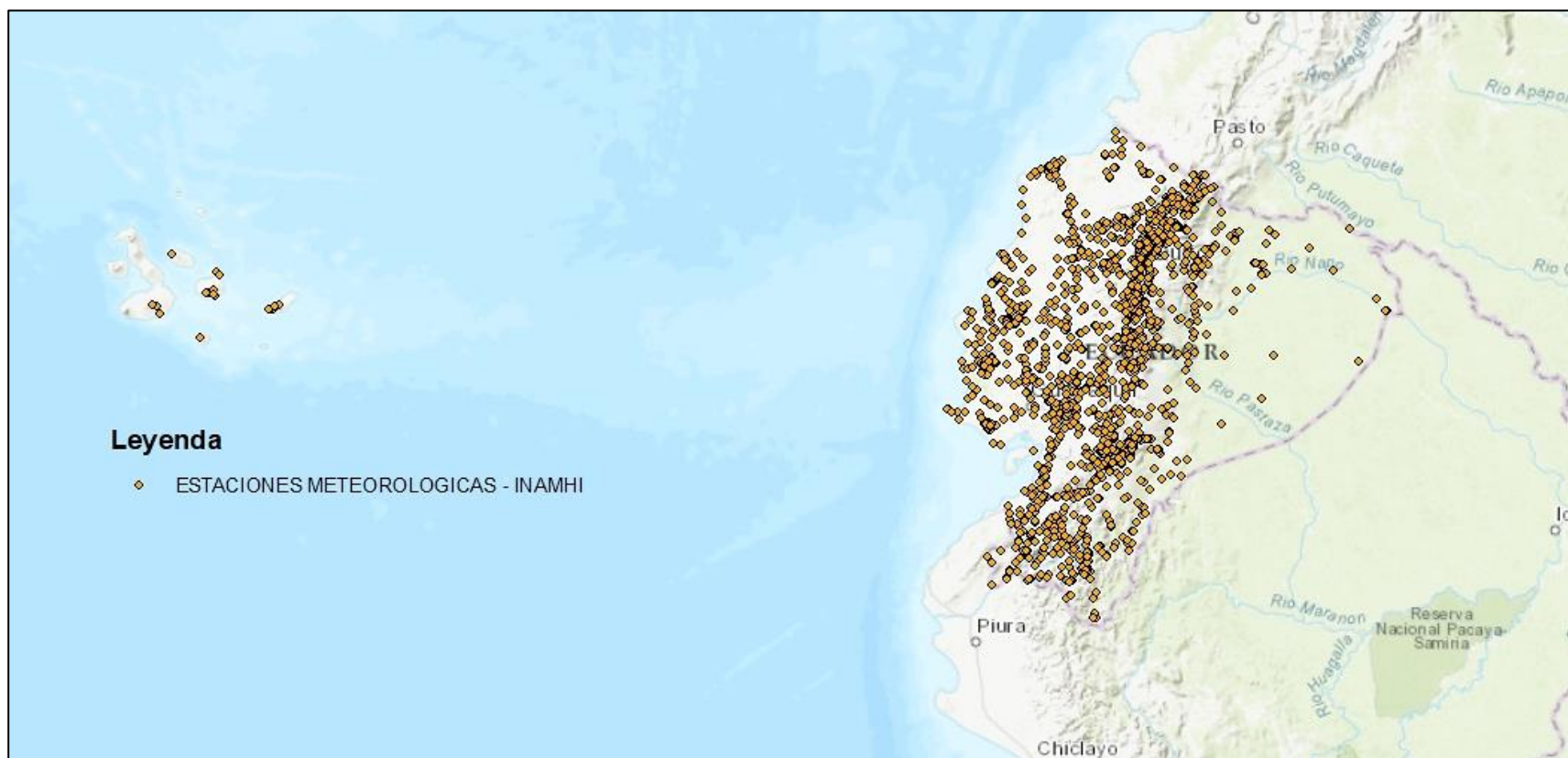
*Figura 14* Ubicación de receptores GPS geodésicos en Ecuador  
Elaborado por: (Lema C., 2018)

Los datos de GPS se cuentan, dependiendo de la estación desde el año 2003 hasta la fecha. Con una resolución temporal que va desde los 15 a los 30 segundos. Lo que los hace sumamente aptos para las mediciones atmosféricas en tiempo real.

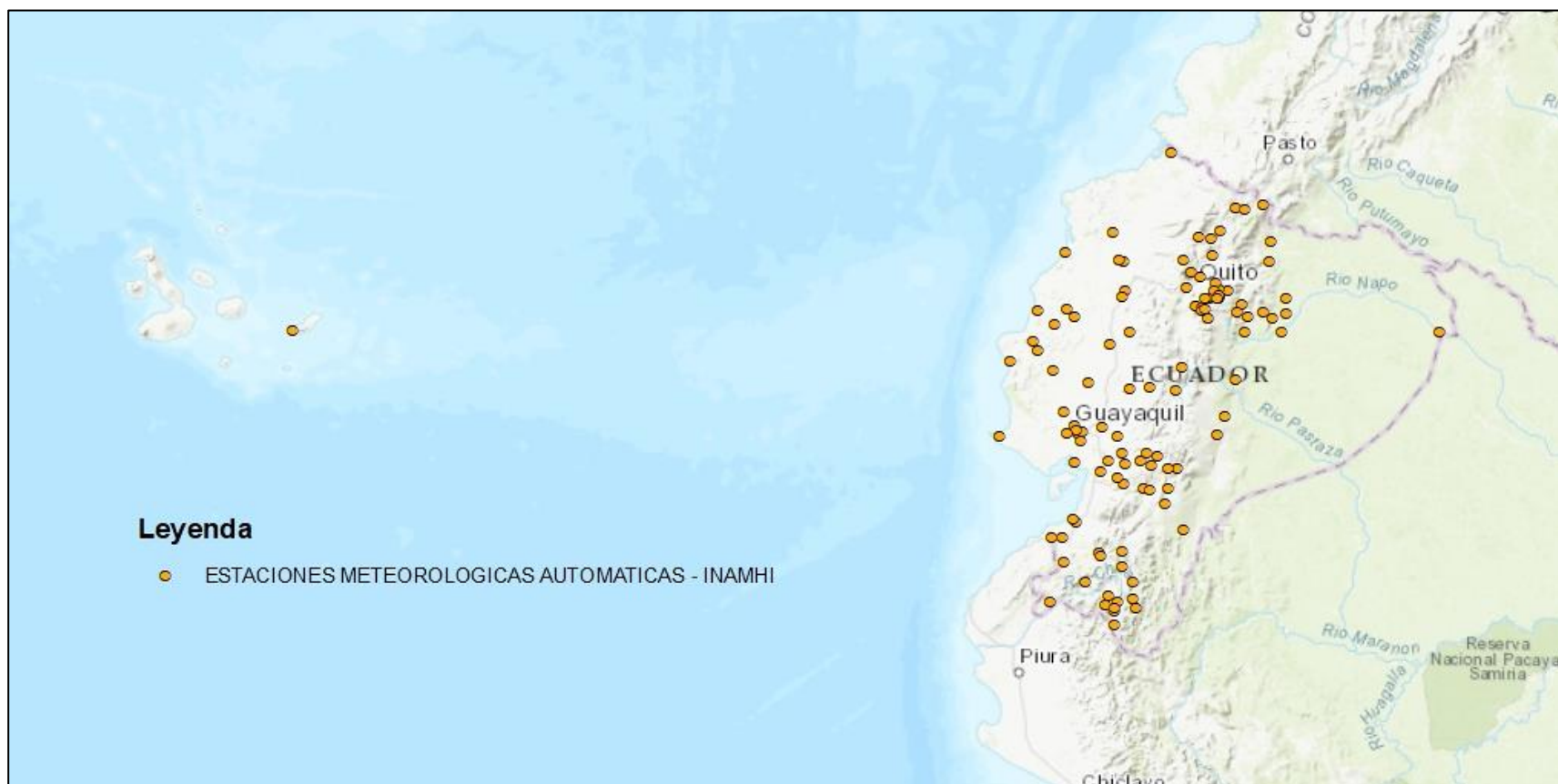
En el caso de las estaciones meteorológicas del INAMHI inicialmente se obtuvo información de 1969 estaciones meteorológicas entre automáticas y convencionales, (Ver Figura 15).

A partir de este mapa, se analiza las características de cada estación conservándose únicamente las estaciones meteorológicas automáticas, debido a que estas presentan una periodicidad horaria a pesar que estas estaciones varían en su tiempo inicial de funcionamiento y operación. Siendo un total de 118 estaciones meteorológicas automáticas.

Se ubica las estaciones meteorológicas automáticas del INAMHI en el mapa del Ecuador usando ArcGIS 10.2.1. (Ver Figura 16).



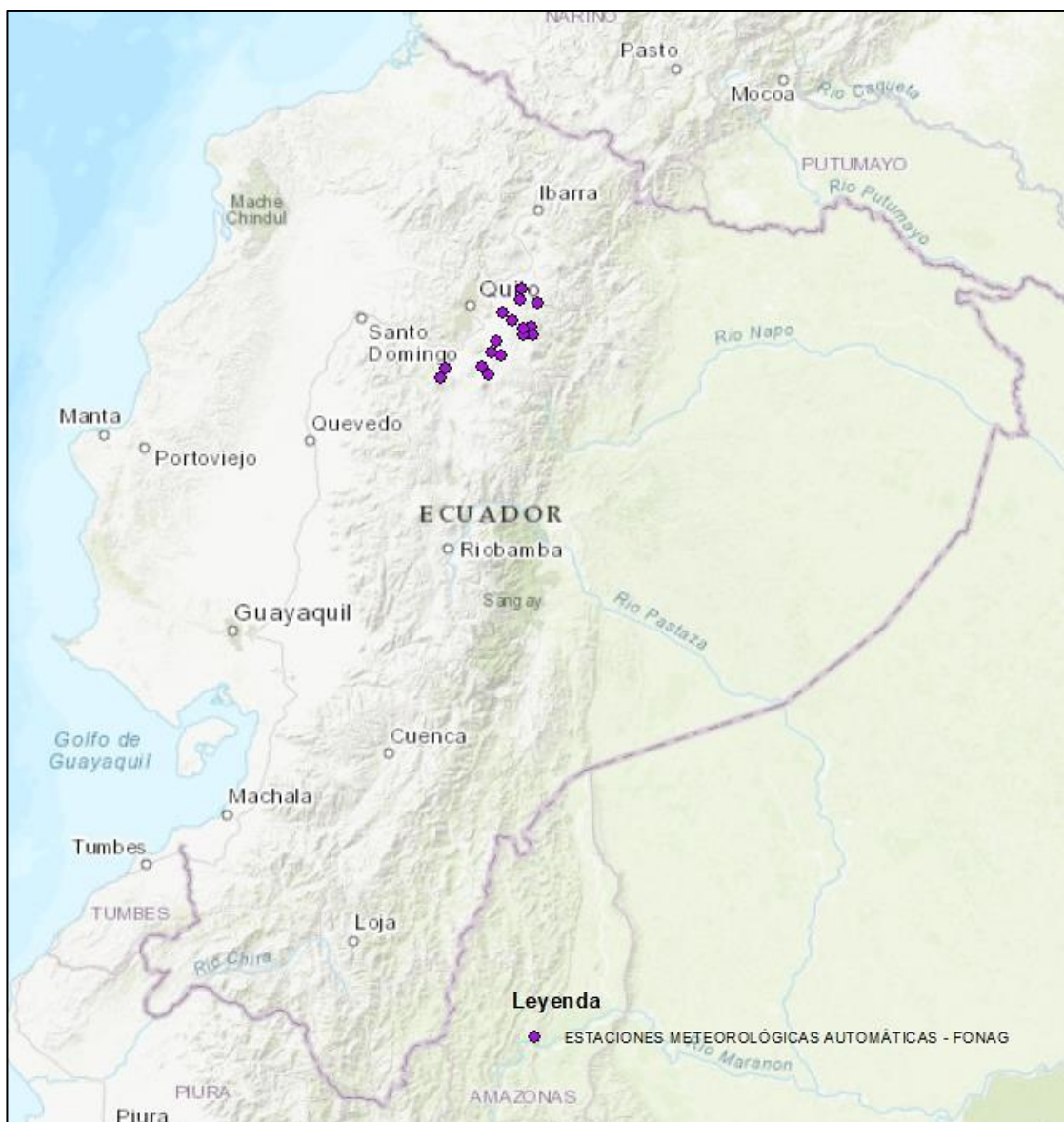
*Figura 15 Estaciones Meteorológicas Convencionales y Automáticas del INAMHI en el Ecuador*  
 Elaborado por: (Lema C., 2018)



*Figura 16* Estaciones Meteorológicas Automáticas del INAMHI en el Ecuador  
Elaborado por: (Lema C., 2018)

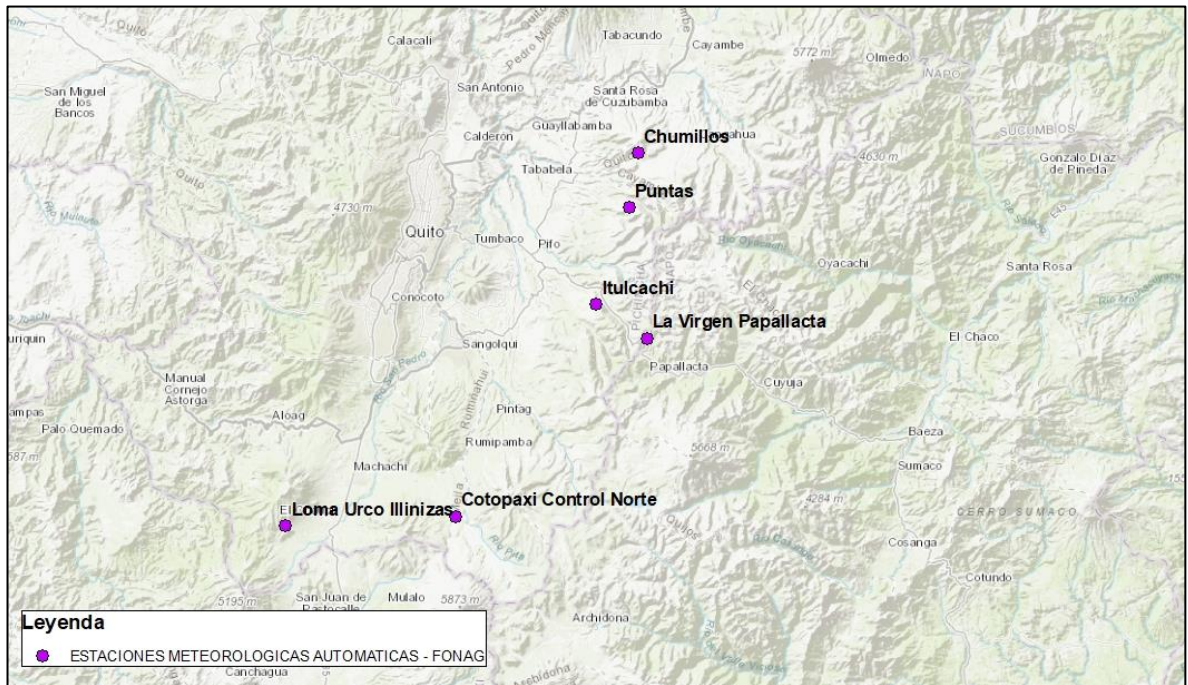


Finalmente, con la información otorgada por parte del FONAG, en cuanto a las estaciones meteorológicas, se las ubica las 16 estaciones con funcionalidad permanente en el mapa del Ecuador usando ArcGIS 10.2.1. (Ver Figura 17).



*Figura 17* Estaciones meteorológicas del FONAG  
Realizado por: (Lema C., 2018)

Igual que en las estaciones del INAMHI, se consideran únicamente a las estaciones meteorológicas automáticas, y se ubican estos puntos en el mapa del Ecuador usando ArcGIS 10.2.1. Quedando únicamente 6 estaciones meteorológicas automáticas (Ver Figura 18).



*Figura 18* Estaciones Meteorológicas Automáticas del FONAG en el Ecuador  
Elaborado por: (Lema C., 2018)

Se cruzó los mapas realizados, con el objetivo de eliminar las estaciones meteorológicas tanto del INAMHI como del FONAG y así realizar una filtración de puntos de estaciones basados en los receptores GPS.

### 6.1.2 Selección de receptores GPS

Se ubicaron los puntos de los 74 receptores GPS, en el Ecuador usando ArcGIS 10.2.1. Se grafica un área de influencia de 10 kilómetros para cada punto de receptores GPS y se descarta a los puntos de receptores GPS que no tengan estaciones meteorológicas automáticas dentro de dicha área.

## **6.2 Análisis geoespacial para la selección de las estaciones GPS y estaciones meteorológicas automáticas**

En esta parte de la investigación, se identificarán los receptores GPS y estaciones meteorológicas que cumplan con los siguientes criterios:

- Que se encuentren a menos de 10 km de distancia, con el objetivo de tanto la señal de retraso troposférico como la data recolectada de temperatura, presión y precipitación correspondan a la misma zona de estudio.
- Que coincidan en sus tiempos de funcionamiento y datos hábiles. De esta manera, los períodos de estudio sólo van a ser posibles sobre los mismos rangos temporales.

Es así que se ubicaron los puntos de los 74 receptores GPS geodésicos, los cuales cuentan con un rango temporal que abarca el año 2010 hasta la fecha, usando ArcGIS 10.2.1. Se grafica un área de influencia de 10 kilómetros para cada punto de receptores GPS.

En primera instancia se filtraron los puntos de las estaciones meteorológicas automáticas del INAMHI y las que se no encontraron ubicadas dentro del área de influencia de 10 kilómetros de radio de cada receptor GPS, fueron descartadas.

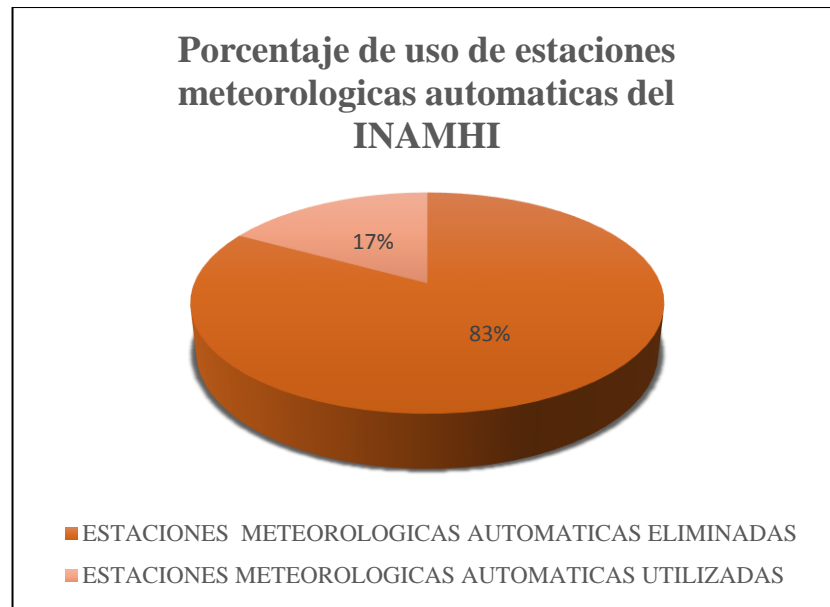
En la Tabla 4, se detallan los nombres de las estaciones meteorológicas automáticas del INAMHI a usarse en el presente trabajo experimental. Se logran 20 estaciones seleccionadas, las cuales tienen datos horarios de precipitación, temperatura y presión atmosférica. En la Figura 19, se grafica porcentualmente la cantidad de

estaciones meteorológicas automáticas eliminadas y utilizadas del INAMHI. En un inicio se contaba con 118 estaciones, y el 83% de las estaciones son eliminadas, quedando un 17% de las estaciones para ser utilizadas en el presente trabajo experimental.

Tabla 4 *Porcentaje de datos nulos y válidos de las estaciones meteorológicas automáticas seleccionadas del INAMHI*

<b>ESTACIONES METEOROLÓGICAS AUTOMATICAS - INAMHI</b>			
<b>CODIGO</b>	<b>NOMBRE</b>	<b>% DATOS NULOS</b>	<b>% DATOS VALIDOS</b>
<b>M0001</b>	INGUINCHO	0,0827%	99,9173%
<b>M0006</b>	PICHILINGUE	0,0199%	99,9801%
<b>M0008</b>	PUYO	0,0379%	99,9621%
<b>M0024</b>	IÑAQUITO	0,0627%	99,9373%
<b>M0105</b>	OTAVALO	0,0261%	99,9739%
<b>M0162</b>	CHONE-U.CATOLICA	0,0355%	99,9645%
<b>M0188</b>	PAPALLACTA	0,8992%	99,1008%
<b>M0427</b>	SAYAUSI	0,9740%	99,0260%
<b>M1036</b>	RIOBAMBA POLITECNICA	0,0327%	99,9673%
<b>M1096</b>	GUAYAQUIL U ESTATAL	1,6183%	98,3817%
<b>M1217</b>	BAHIA DE CARAQUEZ	0,0452%	99,9548%
<b>M1240</b>	IBARRA – 1	0,0516%	99,9484%
<b>M5103</b>	EMOV CUENCA	0,3598%	99,6402%
<b>M5124</b>	CAMPO ALEGRE	0,1072%	99,8928%
<b>M5125</b>	GUAMANI ANTISANA	0,3103%	99,6897%
<b>M5126</b>	JATUNHUAYCO	2,1585%	97,8415%
<b>M5127</b>	CANAL ALUMIES	0,0083%	99,9917%
<b>M5128</b>	MUDADERO	0,4175%	99,5825%
<b>M5129</b>	YANGAHUAGRA	0,0072%	99,9928%
<b>M5131</b>	CAMARONERA SONGA	0,0419%	99,9581%

Elaborado por: (Lema C., 2018)



*Figura 19* Porcentaje de las estaciones meteorológicas automáticas eliminadas y estaciones meteorológicas automáticas utilizadas del INAMHI  
Elaborado por: (Lema C., 2018)

Cada estación meteorológica automática del INAMHI, cuenta con la información otorgada por el mismo ente, como precipitación, temperatura y presión atmosférica, desde el año de su funcionamiento con periodicidad horaria, sin embargo, en algunos lapsos de tiempos las estaciones no cuentan con los datos, debido a factores externos, como daños en los equipos, falta de mantenimiento, entre otros. Es por ello que se realiza una gráfica en la cual se indica el porcentaje de datos válidos y la cantidad de datos nulos que cuenta cada estación meteorológica automática del INAMHI.

De esta manera, se aprecia que el porcentaje de datos válidos para las estaciones del INAMHI es superior en todos los casos al 97%, por lo que las 20 estaciones son aptas para el presente trabajo (Ver Figura 20).

## PORCENTAJE DE DATOS VALIDOS DE LAS ESTACIONES METEOROLOGICAS DEL INAMHI

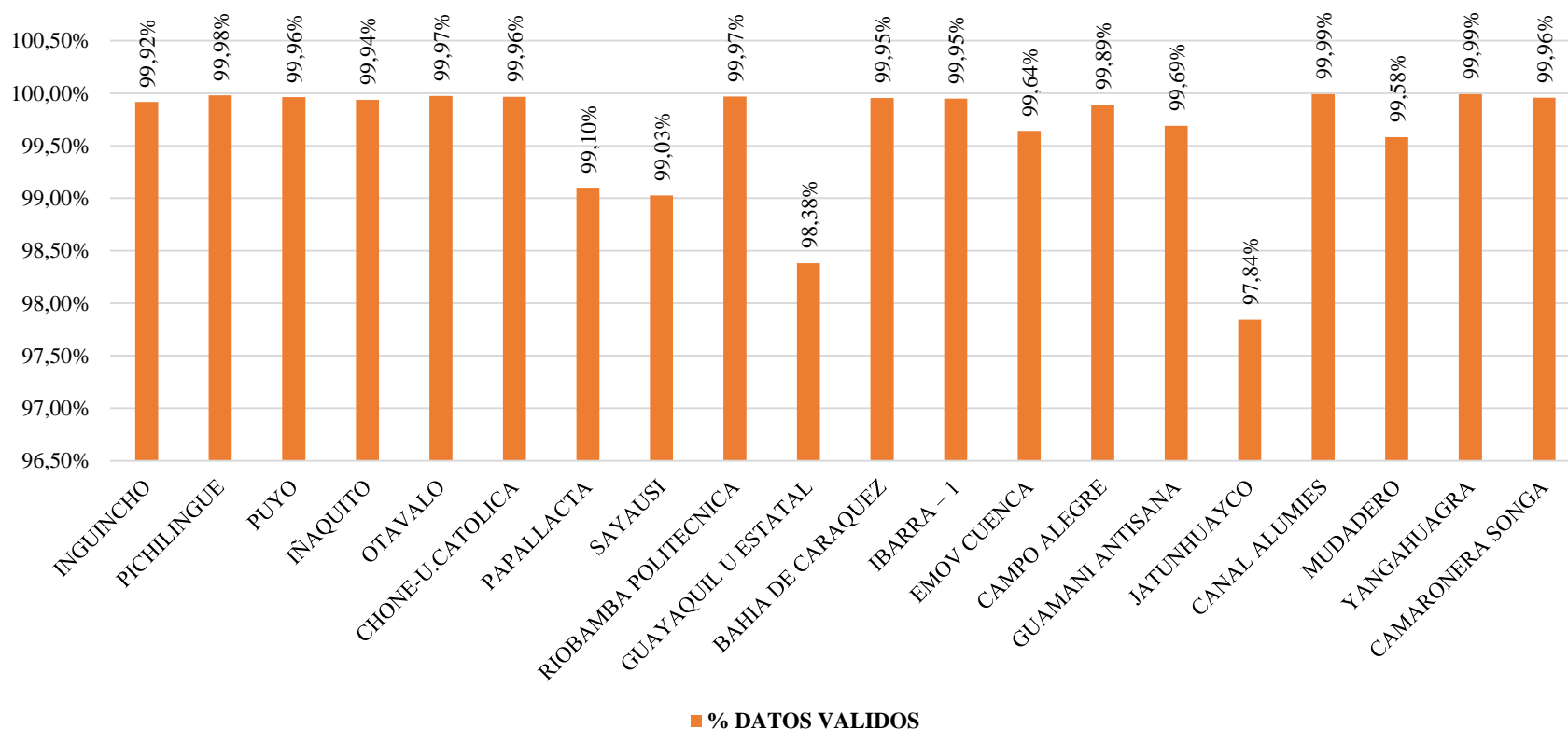


Figura 20 Porcentaje de datos validos de las estaciones meteorológicas automáticas del INAMHI  
Elaborado por: (Lema C., 2018)

En el caso de las estaciones del FONAG, en la tabla 5 se presentan las dos estaciones meteorológicas automáticas que tienen datos horarios de precipitación, temperatura y presión atmosférica; y que están a una distancia menor a 10 kilómetros de los receptores GPS correspondientes. Inicialmente se contaba con 16 estaciones., quedando 2 estaciones seleccionadas. Se utiliza el 13% de las estaciones meteorológicas automáticas del FONAG y el 87 % de las estaciones son eliminadas (Ver Figura 21).

Tabla 5 *Porcentaje de datos nulos y válidos de las estaciones meteorológicas automáticas seleccionadas del FONAG*

<b>ESTACIONES METEOROLÓGICAS AUTOMÁTICAS - FONAG</b>			
<b>CODIGO</b>	<b>NOMBRE</b>	<b>% DATOS NULOS</b>	<b>% DATOS VALIDOS</b>
<b>M5026</b>	COTOPAXI CONTROL NORTE	19,4980%	80,5020%
<b>M5027</b>	LOMA URCO ILLINIZAS	29,9825%	70,0175%

Elaborado por: Lema C., 2018.

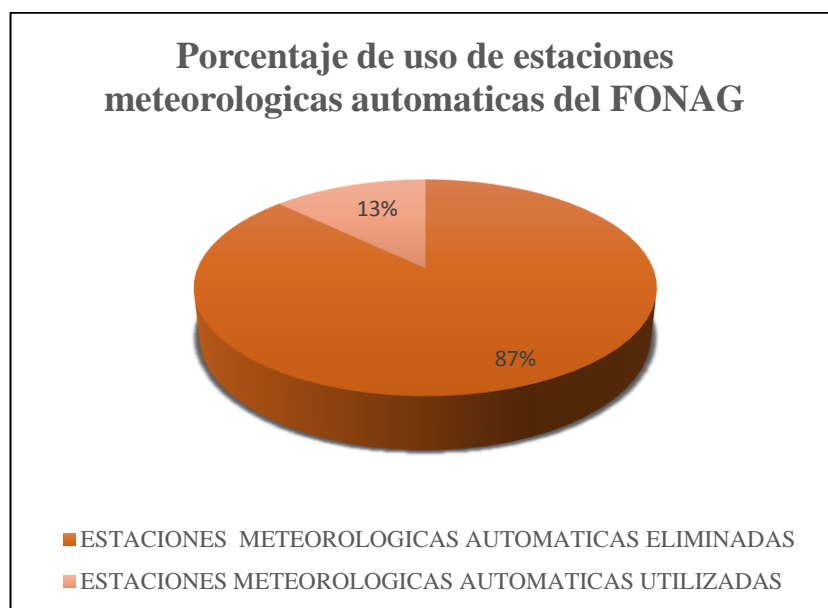
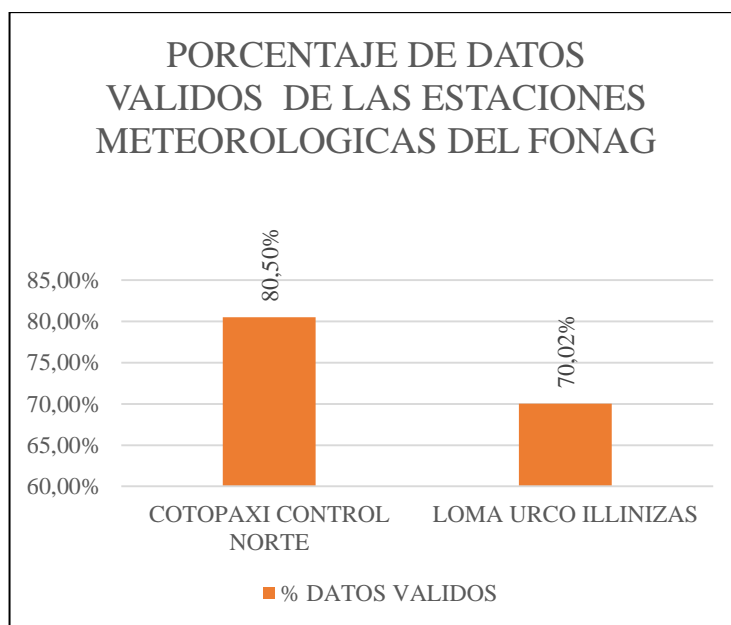


Figura 21 *Porcentaje de las estaciones meteorológicas automáticas eliminadas y estaciones meteorológicas automáticas utilizadas del FONAG*  
Elaborado por: (Lema C., 2018)

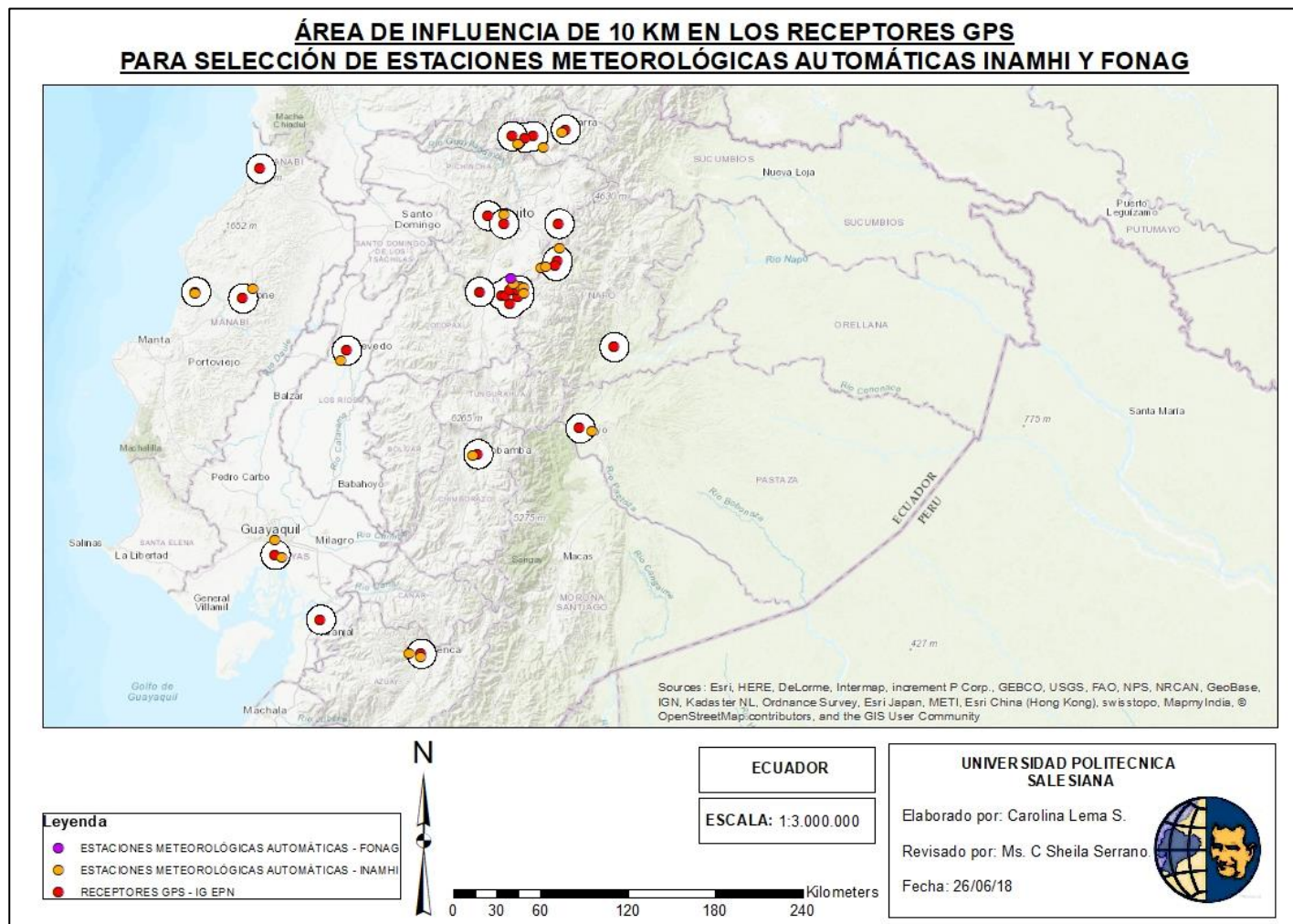
Las estaciones meteorológicas automáticas del FONAG, tienen un rango temporal desde el año 2010 hasta el 2017, con periodicidad horaria. En cuanto a los datos proporcionados de precipitación, temperatura y presión atmosférica, la estación M5027 (LOMA URCO ILLINIZAS) posee un porcentaje bajo de datos validos (70%), por esta razón se la descarta en el presente trabajo (Ver Figura 22).



*Figura 22* Porcentaje de datos válidos de las estaciones meteorológicas del FONAG  
Elaborado por: (Lema C., 2018)

Finalmente, se muestra en la Figura 23, el mapa del Ecuador que contiene a los receptores GPS, cada uno señalando su área de influencia de 10 kilómetros. Además, se puede observar a las estaciones meteorológicas automáticas del INAMHI y del FONAG, que están dentro del área de influencia, las cuales son las que se conservan y serán utilizadas, quedando distribuidas con un total de 27 receptores GPS, 20 estaciones meteorológicas automáticas del INAMHI y 1 estación del FONAG.

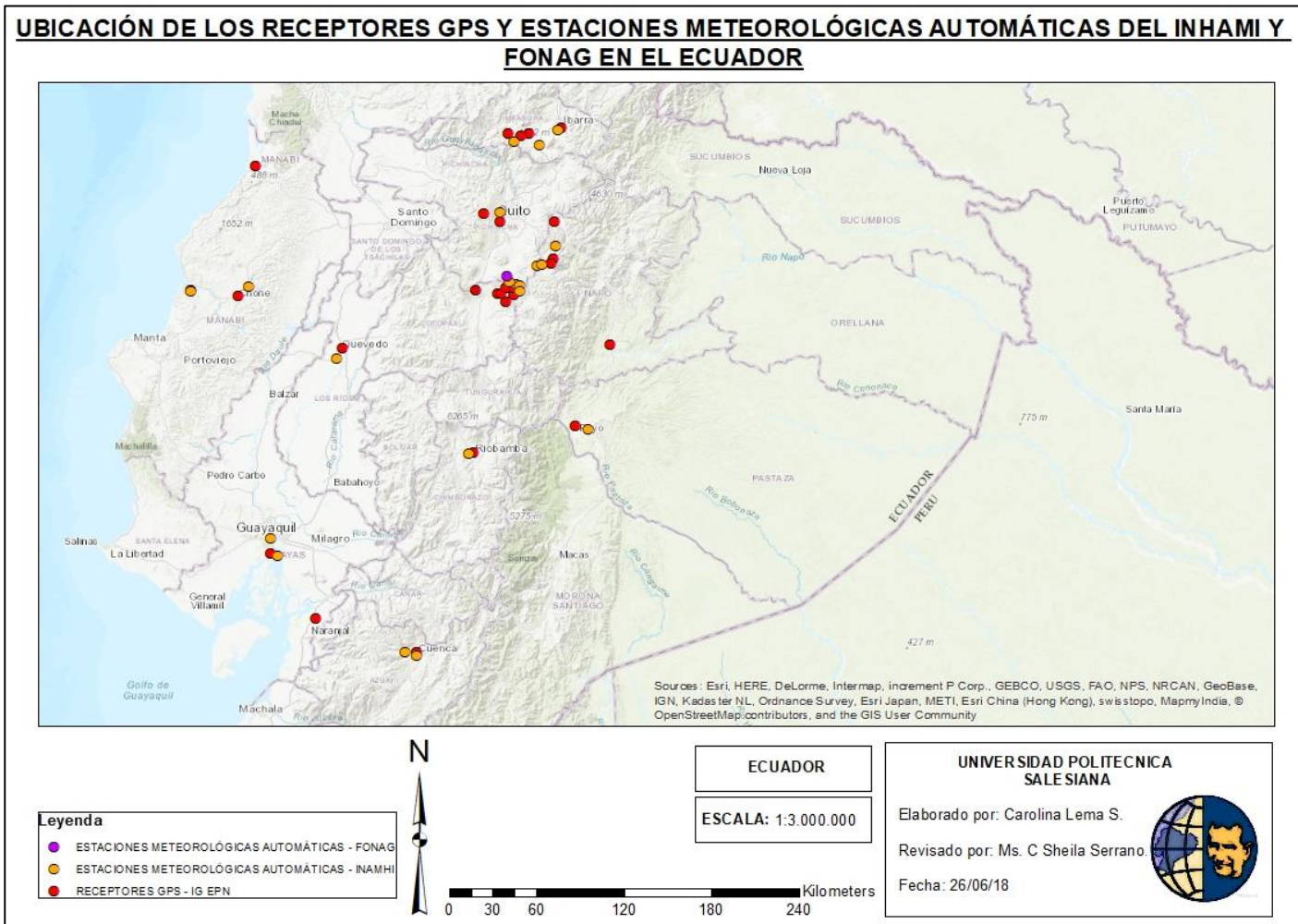




*Figura 23* Área de influencia de 10 kilómetros de cada receptor GPS, que abarca a las estaciones meteorológicas automáticas de INAMHI como del FONAG  
Elaborado por: (Lema C., 2018)

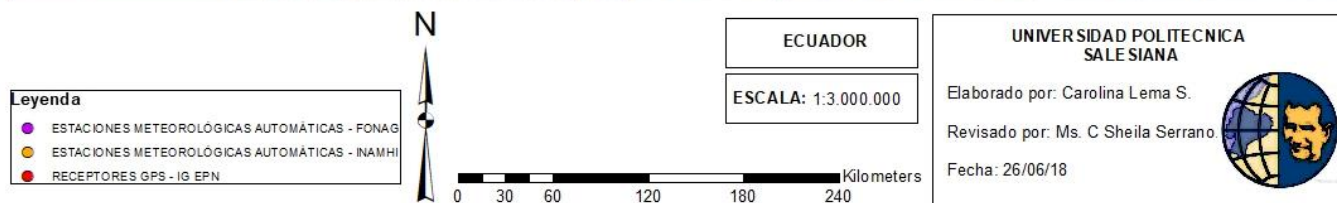
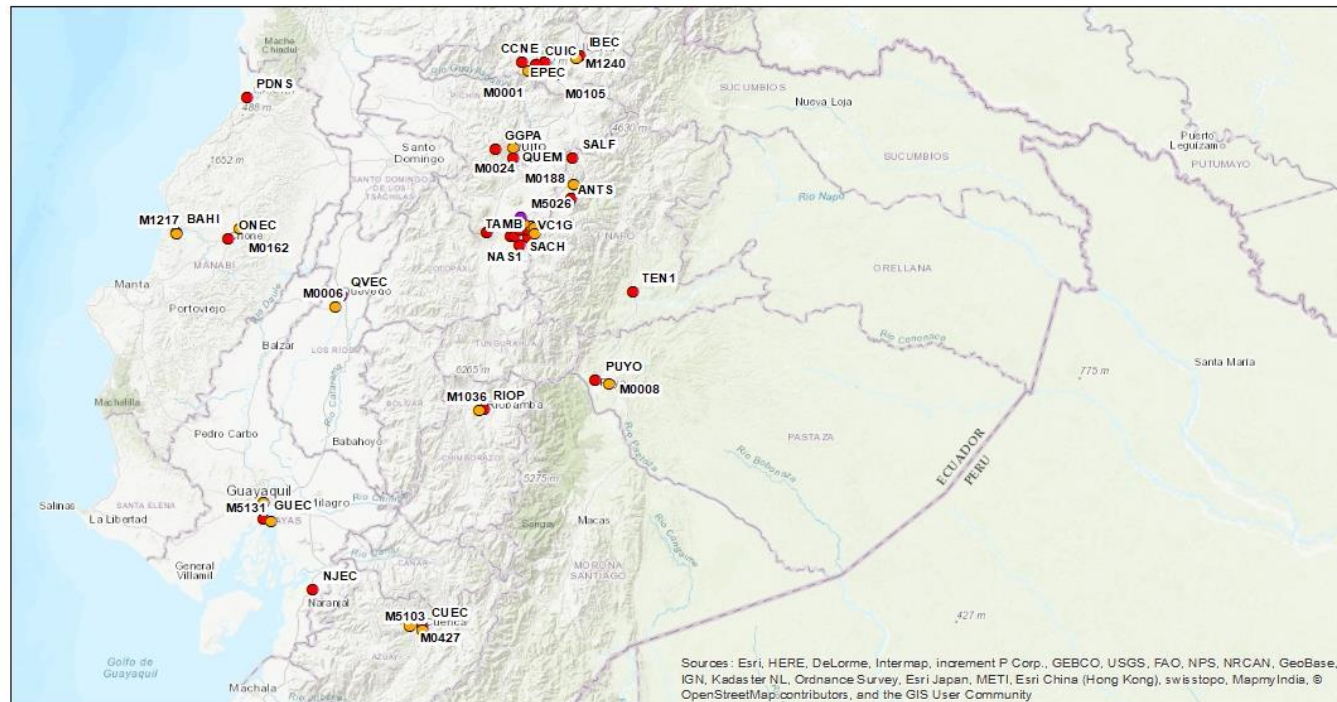
En la Figura 24, se observa la ubicación precisa de todos los receptores GPS geodésicos y estaciones meteorológicas automáticas tanto del INAMHI como la del FONAG finales. Además, En la Tabla 6, se describen las coordenadas geográficas de las estaciones meteorológicas automáticas del INAMHI y FONAG, región a la que pertenece cada una de las estaciones, altura y rango temporal con el que se trabajaría tomando en cuenta que las estaciones GPS cuentan con datos desde el 2010. En la Tabla 7, se describen las coordenadas geográficas de los receptores GPS del IG-EPN, región a la que pertenece cada una de las estaciones, altura, rango temporal con el que se trabajaría y periodicidad.

En la Figura 25, se muestra los códigos que describen a los receptores GPS geodésicos y estaciones meteorológicas automáticas del INAMHI y del FONAG finales, próximas a ser usadas en estudios posteriores.



*Figura 24* Receptores GPS y estaciones meteorológicas del INAMHI y del FONAG definitivos en el Ecuador  
Elaborado por: (Lema C., 2018)

## **UBICACIÓN DE LOS RECEPTORES GPS Y ESTACIONES METEOROLÓGICAS AUTOMÁTICAS DEL INHAMI Y FONAG EN EL ECUADOR**



*Figura 25* Códigos de los receptores GPS y estaciones meteorológicas del INAMHI y del FONAG definitivos en el Ecuador  
Elaborado por: (Lema C, 2018)

Tabla 6 Descripción de las 20 estaciones meteorológicas automáticas del INAMHI y 1 del FONAG

ESTACIONES METEOROLOGICAS CON DATOS HORARIOS AUTOMATICAS DEL INAMHI Y FONAG						
CODIGO	NOMBRE	LATITUD	LONGITUD	REGION	ALTURA m.s.n.m.	RANGO TEMPORAL
M0001	INGUINCHO	0,258333	-78,400833	SIERRA	3140	31/01/2016 - 28/02/2018
M0006	PICHILINGUE	-1,074361	-79,492944	COSTA	81	22/05/2013 - 28/02/2018
M0008	PUYO	-1,5075	-77,943889	AMAZONÍA	960	22/08/2013 - 28/02/2018
M0024	IÑAQUITO	-0,175	-78,485278	SIERRA	2789.12	17/03/2015 - 28/02/2018
M0105	OTAVALO	0,243333	-78,25	SIERRA	2550	21/07/2014 - 27/06/2016
M0162	CHONE-U.CATOLICA	-0,631944	-80,038611	COSTA	36	21/07/2014 - 28/02/2018
M0188	PAPALLACTA	-0,380556	-78,141389	SIERRA	3150	17/03/2015 - 28/02/2018
M0427	SAYAUSI	-2,876806	-79,070167	SIERRA	2711	01/01/2013 - 20/10/2016
M1036	RIOBAMBA POLITECNICA	-1,654722	-78,681111	SIERRA	2740	21/07/2014 - 28/02/2018
M1096	GUAYAQUIL U ESTATAL	-2,180556	-79,899722	COSTA	6	01/01/2013 - 16/06/2017
M1217	BAHIA DE CARAQUEZ	-0,659444	-80,392778	COSTA	12	21/07/2014 - 28/02/2018
M1240	IBARRA – 1	0,32975	-78,132222	SIERRA	2247	21/07/2014 - 28/02/2018
M5103	EMOV CUENCA	-2,897244	-79,003361	SIERRA	2525	01/07/2014 - 28/02/2018
M5124	CAMPO ALEGRE	-0,616111	-78,388639	SIERRA	3861	13/06/2016 - 28/02/2018
M5125	GUAMANI ANTISANA	-0,503778	-78,259417	SIERRA	4148	08/10/2015 - 28/02/2018
M5126	JATUNHUAYCO	-0,490972	-78,232861	SIERRA	4052	05/10/2015 - 28/02/2018
M5127	CANAL ALUMIES	-0,600211	-78,429444	SIERRA	3904	12/06/2016 - 28/02/2018
M5128	MUDADERO	-0,625278	-78,368889	SIERRA	3898	12/06/2016 - 28/02/2018
M5129	YANGAHUAGRA	-0,662019	-78,364606	SIERRA	3984	12/06/2016 - 28/02/2018
M5131	CAMARONERA SONGA	-2,287008	-79,858189	COSTA	3	18/05/2015 - 28/02/2018
M5026	COTOPAXI CONTROL NORTE (FONAG)	9937618	784573	SIERRA	3670	01/01/2010 - 31/12/2017

Elaborado por: (Lema C., 2018)



Tabla 7 Descripción de los 27 receptores GPS geodésicos del IG-EPN

RECEPTORES GPS DEL IG-EPN						
CODIGO	NOMBRE	LATITUD	LONGITUD	REGION	RANGO TEMPORAL	PERIODICIDAD
1	BAHI	-0,65	-80,39	COSTA	15/06/2008 - 25/06/2018	15 segundos
2	ONEC	-0,69	-80,1	COSTA	28/06/2008 - 14/07/2018	30 segundos
3	PDNS	0,11	-79,99	COSTA	31/05/2016 - 14/07/2018	15 segundos
4	CUEC	-2,88	-79	SIERRA	28/05/2012 - 26/06/2018	15 segundos
5	EPEC	0,31	-78,44	SIERRA	31/05/2016 - 14/07/2018	30 segundos
g6	GUEC	-2,27	-79,9	COSTA	10/04/2008 - 14/07/2018	30 segundos
7	IBEC	0,35	-78,11	SIERRA	28/05/2012 - 26/06/2018	30 segundos
8	NJEC	-2,67	-79,62	COSTA	31/05/2016 - 14/07/2018	30 segundos
9	PSTO	-0,65	-78,64	SIERRA	04/08/2010 - 31/06/2017	15 segundos
10	PUYO	-1,49	-78,02	AMAZONÍA	22/05/2008 - 20/02/2018	15 segundos
11	QUEM	-0,23	-78,49	SIERRA	10/06/1996 - 14/07/2018	30 segundos
12	QVEC	-1,01	-79,46	COSTA	04/08/2010 - 31/06/2017	30 segundos
13	RIOP	-1,65	-78,65	SIERRA	10/04/2008 - 14/07/2018	30 segundos
14	TEN1	-0,99	-77,81	AMAZONÍA	11/10/2011 - 15/04/2018	15 segundos
15	ANTN	-0,46	-78,16	SIERRA	22/05/2008 - 20/02/2018	15 segundos
16	ANTS	-0,49	-78,17	SIERRA	10/06/1996 - 14/07/2018	30 segundos
17	CAME	-0,67	-78,5	SIERRA	04/08/2010 - 31/06/2017	30 segundos
18	CCNE	0,31	-78,31	SIERRA	22/05/2008 - 20/02/2018	15 segundos
19	CONE	-0,65	-78,41	SIERRA	01/01/2007 - 14/07/2018	15 segundos
20	CUIC	0,3	-78,36	SIERRA	04/08/2010 - 31/06/2017	15 segundos
21	GGPA	-0,18	-78,59	SIERRA	28/05/2012 - 26/06/2018	15 segundos
22	MORU	-0,72	-78,45	SIERRA	10/06/1996 - 14/07/2018	15 segundos

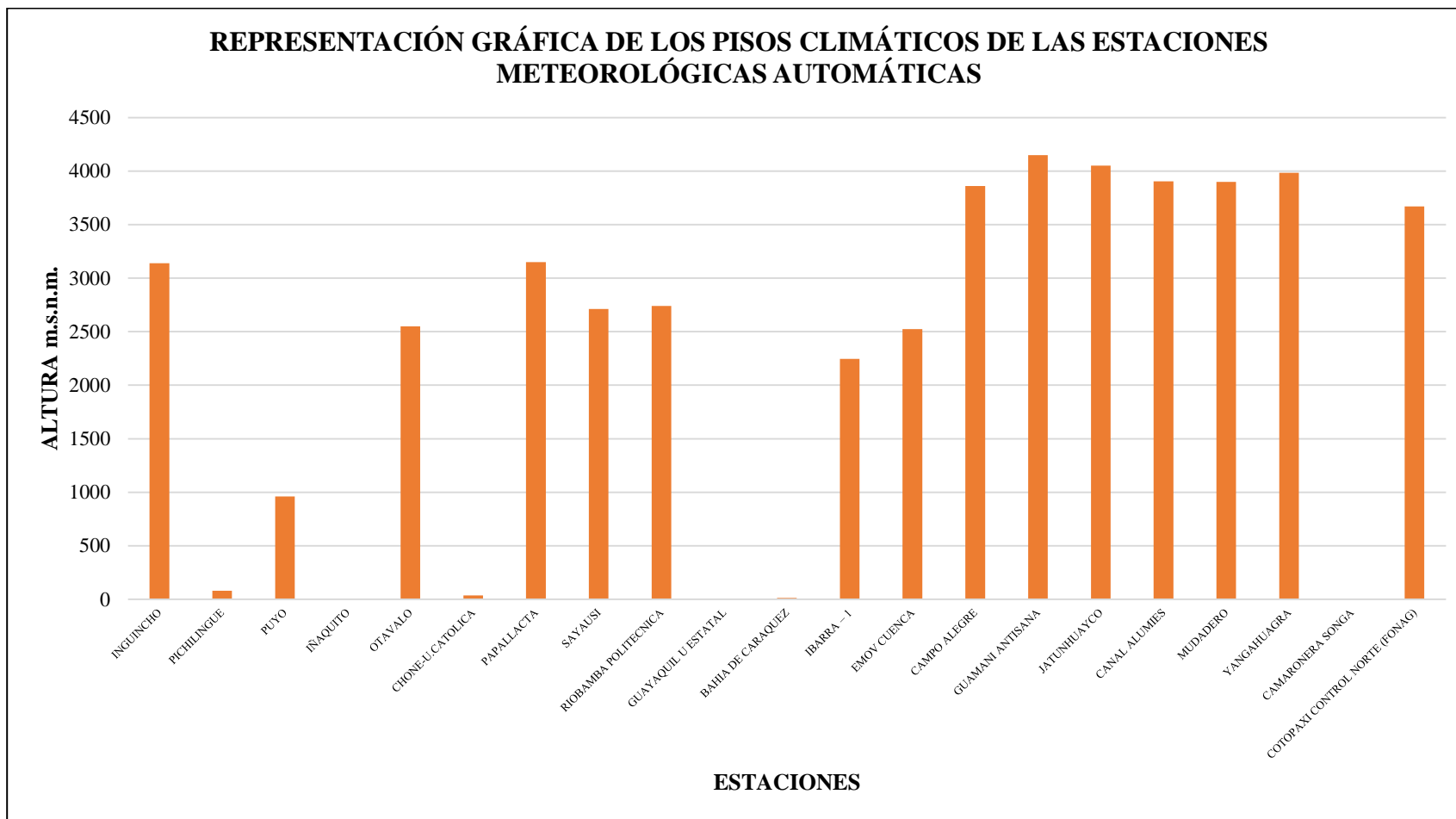
<b>23</b>	NAS1	-0,67	-78,48	SIERRA	22/05/2008 - 20/02/2018	30 segundos
<b>24</b>	SACH	-0,64	-78,45	SIERRA	31/05/2016 - 14/07/2018	30 segundos
<b>25</b>	SALF	-0,23	-78,15	SIERRA	04/08/2010 - 31/06/2017	30 segundos
<b>26</b>	TAMB	-0,68	-78,4	SIERRA	22/05/2008 - 20/02/2018	15 segundos
<b>27</b>	VC1G	-0,64	-78,4	SIERRA	31/05/2016 - 14/07/2018	15 segundos

Elaborado por: (Lema C., 2018)

Fuente: (UNAVCO, 2018)

En la Figura 26 se analiza la ubicación de las estaciones meteorológicas automáticas del INAMHI y del FONAG, con el fin de expresar gráficamente los pisos climáticos a los que corresponde cada estación, considerando especialmente la altura a nivel del mar, permitiendo la facilidad de representar a estas estaciones pertenecientes a la Región Costa, Sierra o Amazonía, debido a su variada altura. En la zona templada que va desde los 1000 a los 2000 m.s.n.m., se puede observar que hay eficiencia de estaciones meteorológicas automáticas.





*Figura 26* Pisos climáticos a los que se encuentran ubicadas las estaciones meteorológicas automáticas del INAMHI y FONAG, en el Ecuador  
Elaborado por: (Lema C., 2018)

### 6.3 Discusión

La presente investigación conlleva dos partes con el objetivo de evidenciar la factibilidad de obtener representatividad geográfica, a través del cruce de información de receptores GPS y estaciones meteorológicas.

En la primera parte de la investigación, referente a la recolección de la data para identificar a los principales actores, se evidencia que en Ecuador sí existe una amplia red de monitoreo, tanto de receptores GPS como estaciones meteorológicas. Sin embargo, existen puntos en los que se acumula la toma de información y otros que quedan muy desprovistos de ésta.

En el caso de estaciones GPS, la mayoría de datos se ubican cerca de los volcanes, obviamente debido al interés científico de movimiento alrededor de éstos, pero sobretodo los del norte de Ecuador –que es más activo sísmicamente-, asimismo alrededor de fallas conocidas como la de Santa Elena y en el borde costero donde se unen las placas de Nazca y la Sudamericana; pero no hay datos en Galápagos, casi no hay datos de la Amazonía ecuatoriana y en el sur del país. Temporalmente hablando, los datos GPS, están disponibles desde el 2010, pero su adquisición ha sido demorada, y luego de largos procesos y solicitudes se ha podido obtenerlos.

En el caso de las estaciones meteorológicas, el contar con 1969 estaciones (Figura 15) parecería bastante, pero la mayoría obtiene datos mensuales y sólo de caudales o pluviómetros analógicos, las que cuentan con datos diarios y con más variada información meteorológica como precipitación, temperatura y presión atmosférica, son las estaciones meteorológicas automáticas siendo un total de 118 (Figura 16). Sin

embargo, a través de la selección, basados en los GPS, se obtuvo 20 estaciones meteorológicas finales del INAMHI, ubicándose la mayor parte de estas en la Sierra, con un total de 15 estaciones meteorológicas automáticas cercanas a las principales ciudades Como Quito, Guayaquil y Cuenca. En la Costa se cuenta con 5 estaciones meteorológicas automáticas, mientras que en la Amazonía se cuenta con una sola estación meteorológica automática. En Galápagos sólo hay una estación automática, en Puerto Baquerizo moreno, pero no se la considera dentro de la selección de puntos puesto que en esta región actualmente no cuenta con receptores GPS (Ver Figura 16).

Sin embargo, cabe indicar que el hecho de tener la mayoría de los datos en la Sierra es beneficioso ya que es una de las regiones con el clima y los eventos extremos más difícil de explicar y predecir.

Hay que indicar que la calidad de la data es buena ya que todas cuentan con más del 97% de datos, y con datos desde el 1 de enero de 2013.

Finalmente, en cuanto a las estaciones del FONAG, las 16 estaciones presentaban la serie de tiempo más larga, ya que se contaban datos desde el año 2010, pero la cantidad de datos disponibles no es tan alta. Después del análisis geográfico sólo se pudo contar con una, la estación de Cotopaxi Control Norte, la cual está ubicada cerca a otras estaciones meteorológicas del INAMHI e IG.

Finalmente, luego del análisis espacial, se encontró que existe representatividad de datos para la Costa, Sierra y Amazonía, así como datos de diferentes alturas (Ver Figura 26) que permitan la elaboración de relaciones bien establecidas y cuantificadas entre el vapor de agua y la lluvia intensa en futuras investigaciones.

## **7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **7.1 CONCLUSIONES**

Del presente trabajo, se concluye que existen 21 estaciones meteorológicas automáticas que coincidan espacial y temporalmente considerando los datos de retraso troposférico, logrado mediante los receptores GPS geodésicos, así como de las variables de precipitación, temperatura, presión atmosférica, obtenidos de estas estaciones, sobre el Ecuador continental.

Los puntos de estudio de estaciones meteorológicas del INAMHI y FONAG, se encuentran distribuidas por todo el Ecuador; en la Región Sierra con el 71,43% en la Costa con el 23,81% y en la Amazonía con el 4,76%, siendo esta última la región con menos representatividad.

En cuanto a los rangos de altura, se presentan estaciones que van desde los 3 hasta los 4148 m.s.n.m, aunque hay que indicar que en el rango de los 1000 a los 2000 m.s.n.m no hay estaciones meteorológicas automáticas, que corresponde al piso climático templado (Ver Figura 26).

El rango temporal que se tomaría en cuenta tanto de receptores como de estaciones meteorológicas, abarcaría desde el 1 de enero de 2013 hasta la presente fecha, lo cual implica al menos 5 años de datos para realizar validaciones de los modelos que se obtendrán en futuras investigaciones.

## **7.2 RECOMEDACIONES**

El uso de las señales GPS en otras investigaciones ambientales, meteorológicas e hidrológicas en general, puede ser consideradas no sólo por su gran precisión, cobertura espacial y temporal (ya que pueden ser tomadas a pesar del mal tiempo); sino también por sus bajos costos, y su información puede ser obtenida de bases de datos internacionales como UNAVCO y de redes nacionales como la RENGEO del IG.

Finalmente, se debe seguir con el estudio de la variable vapor de agua troposférico y sus implicaciones meteorológicas relacionadas tanto con la presencia de lluvia intensa como de posibles sequías.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- Admin, 2011. RADIOSONDA. Recuperado de Tiempo.com <https://www.tiempo.com/ram/14577/%E2%80%9Ckazando%E2%80%9D-un-radio-sonda-31-marzo-2011/>
- Amaya, R. (2002). Selección y establecimiento de especies forestales de acuerdo al régimen pluviométrico de Loma Alta, Arteaga, Coahuila (Tesis de pregrado) Universidad autónoma agraria “Antonio Narro”, México.
- Auge, M. (2007). Agua fuente de vida. *Salud Mundial*, 31. Recuperado de <http://tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/miguel/AguaFuenteVida.pdf>
- Basantes, J. (2016) Análisis de factibilidad técnica y de viabilidad comercial de dispositivos para localización de mascotas caninas mediante el uso de tecnología GPS en distrito metropolitano de quito (tesis de grado). Pontificia universidad católica del ecuador
- Bidegaing, M. Necco, G. Pisciotano, . (2011). CURSO de ELEMENTOS DE METEOROLOGIA Y CLIMA 2011 Bolilla I, 16. Recuperado de [http://meteo.fisica.edu.uy/Materias/elementos\\_met\\_y\\_clima/teorico\\_elementos\\_met\\_y\\_clima/Bol1b\\_Atmosfera.pdf](http://meteo.fisica.edu.uy/Materias/elementos_met_y_clima/teorico_elementos_met_y_clima/Bol1b_Atmosfera.pdf)
- Businger S, Chiswell SR, Bevis M, Duan J, Anthes RA, Rocken C, Ware RH, Exner M, VanHove T, Solheim FS. (1996). The promise of GPS in atmospheric monitoring. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 5–18. DOI: 10.1175/1520-0477(1996)077<0005:TPOGIA>2.0.CO;2.
- Buytaert W, Celleri R, Willems P, Bièvre B De, Wyseure G. (2006). Spatial and temporal rainfall variability in mountainous areas: A case study from the south Ecuadorian Andes. *Journal of Hydrology* 329(3–4): 413–421. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2006.02.031.
- Carbajal Azcona A, & Gonzales Fernandez M. (2013). Propiedades físicas y químicas del agua. *Agua*, 1–16. Recuperado de <https://www.ucm.es/.../458-2013-07-24-Carbajal-Gonzalez-2012-ISBN-9>
- CIAT. (2007). GPS-Global Positioning System, 29.
- Cioce, V., Hoyer, M., Wildermann, E., Royero, G., & Díaz, A. (2011). Determinación del vapor de agua troposférico a través de observaciones gps: Primeros ensayos en Venezuela. *Interciencia*, 36(10), 721–730.
- Concha Valenzuela, L. (2016). La química del Agua. *I*, 1(1), 15. Recuperado de <https://doi.org/8451695>
- CX .(2015). Precisión (HRMS) tras la corrección diferencial (HRMS). Recuperado de

<http://www.cartesia.org/foro/viewtopic.php?p=92174>

- Espinoza, J. C., Ronchail, J., Guyot, J. L., Junquas, C., Drapeau, G., Martinez, J. M., ... Espinoza, R. (2012). From drought to flooding: Understanding the abrupt 2010-11 hydrological annual cycle in the Amazonas River and tributaries. *Environmental Research Letters*, 7(2). Recuperado de <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/2/024008>
- Fernández, L. I., Meza, A. M., & Natali, M. P. (2009). Determinación del contenido de vapor de agua precipitable (PWV) a partir de mediciones GPS: primeros resultados en Argentina. *Geoacta*, 34(2), 35–57. Recuperado de [http://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1852-77442009000200001&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1852-77442009000200001&script=sci_arttext)
- Franco, S. (2006) Redes GPS México y su aplicación en la sismotectónica (tesis doctoral). Universidad Nacional Autonoma de Mexico. Recuperado de [http://usuarios.geofisica.unam.mx/vladimir/students/Tesis\\_SI\\_Franco\\_2006\\_impre sa.pdf](http://usuarios.geofisica.unam.mx/vladimir/students/Tesis_SI_Franco_2006_impre sa.pdf)
- Gamache, J. F., & Houze, R. A. (1983). Water Budget of a Mesoscale Convective System in the Tropics. *Journal of the Atmospheric Sciences*. Recuperado de [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1983\)040<1835:WBOAMC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1983)040<1835:WBOAMC>2.0.CO;2)
- Gómez, V. (2012). Interfaz de comunicación entre una estacion de monitoreo y una estacion central de GNSS (tesis de posgrado). Instituto politecnico nacional Recuperado de <https://doi.org/Tesis de Ingenieria Civil. Ciencias Marinas, 49 Suppl 1, 104.>
- GPS.gov, (2017). GPS Control Segment Map. Recuperado de <https://www.gps.gov/multimedia/images/GPS-control-segment-map.pdf>
- Hämmerly, R. (2001). Modelación de la evapotranspiración con métodos de balance de agua (Tesis de maestría) Universidad nacional del litoral.
- Henao Melo, L. G. (2014). Diseño de un equipo de rastreo satelital de elementos usando tecnologías GPS y GSM, 72. Recuperado de <http://hdl.handle.net/11059/4895>
- Huerta Eduardo; Mangiaterra Aldo; Noguera Gustavo. (2005). *GPS Posicionamiento Satelital*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Instituto Oceanográfico de la Armada [INOCAR]. (2012). Información General de la República del Ecuador. *Fuerzas Armadas*, 13–24.
- Jade S, Vijayan MSM. (2008). GPS-based atmospheric precipitable water vapor estimation using meteorological parameters interpolated from NCEP global reanalysis data. *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 113(3): 1–12. DOI: 10.1029/2007JD008758.
- Kenguruka H. (2014). Estimacion del error de la posicion GPS por efectos Ionosféricos. Mexico, D.F. Instituto Politécnico Nacional. Recuperado de

<http://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/18005/Estimacion%20del%20error%20de%20la%20posicion%20GPS%20por%20efectos%20ionosfericos.pdf?sequence=1>

KOLLNER LABRAÑA & CIA. LTDA, (s.f.) Servicio Técnico Sokkia, Laboratorio de Calibración, Arriendo y Venta. Descripción de Sistema GPS. Recuperado de [http://www.kollnerlabrana.cl/PDF/404\\_Descripcion%20del%20sistema%20GPS.pdf](http://www.kollnerlabrana.cl/PDF/404_Descripcion%20del%20sistema%20GPS.pdf)

MetEd, (2018) Percepción remota por microondas: nubes, precipitación y vapor de agua. Recuperado de [https://www.meted.ucar.edu/training\\_module.php?id=476#.W0uvstJKhPY](https://www.meted.ucar.edu/training_module.php?id=476#.W0uvstJKhPY)

Moya, R. (2006). Climas Del Ecuador. *Inhami*. Recuperado de [http://186.42.174.231/gisweb/METEOROLOGIA/CLIMATOLOGIA/Climas del Ecuador 2006.pdf](http://186.42.174.231/gisweb/METEOROLOGIA/CLIMATOLOGIA/Climas%20del%20Ecuador%202006.pdf)

Neelin JD, Peters O, Hales K. (2009). The Transition to Strong Convection. *Journal of the Atmospheric Sciences*66(8): 2367–2384. DOI: 10.1175/2009JAS2962.1.

Ordoñez J. (2011). CARTILLA TÉCNICA: CICLO HIDROLÓGICO. Recuperado de [http://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam\\_files/publicaciones/varios/ciclo\\_hidrologico.pdf](http://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/ciclo_hidrologico.pdf) [Acceso el 25 de junio de 2017]

Ortíz, J. & Valladolid. (2013). Caracterización del contenido del vapor de agua atmosférico con receptores GPS. Recuperado de [https://repositorio.aemet.es/bitstream/20.500.11765/2918/1/TyC\\_2013\\_39\\_01.pdf](https://repositorio.aemet.es/bitstream/20.500.11765/2918/1/TyC_2013_39_01.pdf)

Palacios, J., & Rosero, D. (2014). Análisis de las condiciones climáticas registradas en el Ecuador continental en el año 2013 y su impacto en el sector agrícola, 1–27. Recuperado de <http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/uploads/2014/01/Informe2014SNGR.pdf>

Peters O, Christensen K. (2002). Rain: Relaxations in the sky. *Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*66(3): 1–9. DOI: 10.1103/PhysRevE.66.036120.

Peters O, Neelin JD. (2006). Critical phenomena in atmospheric precipitation. *Nature Physics*2(6): 393–396. DOI: 10.1038/nphys314.

Priego De Los Santos, J. E. (2012). Análisis y predicción de lluvias intensas en la Comunidad Valenciana basados en la estimación del contenido de vapor de agua atmosférico obtenido con técnicas GNSS. Recuperado de <http://www.tdx.cat/handle/10803/94487>

Raya, J. (2003) Composición isotópica del vapor de agua atmosférico en el suroeste de la península Ibérica (tesis doctoral). Universidad de Granada, España.

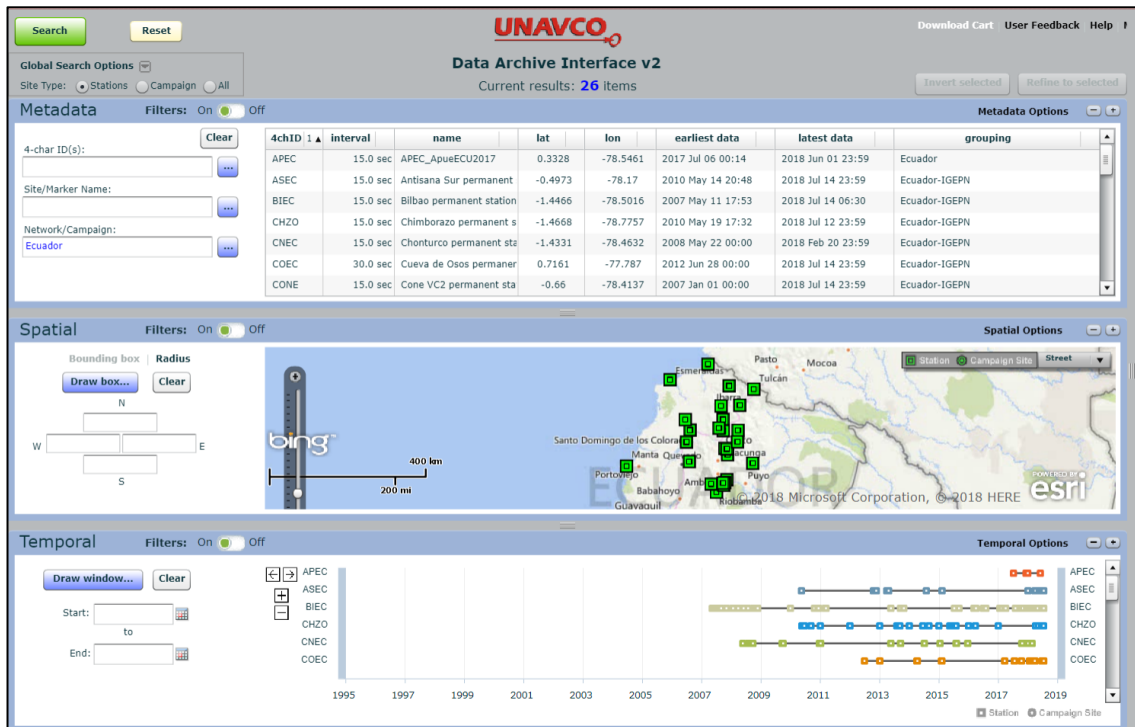


- Reyes S. (2009). Sistema de Posicionamiento Global GPS aplicado al control de maquinaria pesada. Instituto Politécnico Nacional. Recuperado de [http://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/4937/1/409\\_SISTEMA%20DE%20POSICIONAMIENTO%20GLOBAL%20GPS%20APLICADO%20AL%20CONTROL%20DE%20MAQUINARIA%20PESADA.pdf](http://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/4937/1/409_SISTEMA%20DE%20POSICIONAMIENTO%20GLOBAL%20GPS%20APLICADO%20AL%20CONTROL%20DE%20MAQUINARIA%20PESADA.pdf)
- RENGEO. (2018). RED NACIONAL DE GEODESIA. Escuela Politécnica Nacional, Quito-Ecuador. Recuperado de <https://www.igepn.edu.ec/red-nacional-de-geodesia>
- RIOACHA. (2007) Mejora de los sistemas de cartografía del territorio colombiano. Centro Internacional de Agricultura Tropical. Recuperado de [ftp://gisweb.ciat.cgiar.org/DAPA/planificacion/GEOMATICA/GPS/GPS\\_Modulo.pdf](ftp://gisweb.ciat.cgiar.org/DAPA/planificacion/GEOMATICA/GPS/GPS_Modulo.pdf)
- Selvam A. (2017). Self-organized Criticality and Predictability in Atmospheric Flows. . DOI: 10.1007/978-3-319-54546-2.
- Suárez W. (2009). Generación de un modelo de retraso troposférico a partir de medidas meteorológicas superficiales y GPS en los puntos ESPE-CIE-S061. Escuela Politécnica del Ejército, Sangolquí-Ecuador. Recuperado de <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/759/1/T-ESPE-026605.pdf>
- Toledo, A. (2002) El agua en México y el mundo. Sistema de Información Científica Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal (64), 9-18. Recuperado de <http://www.redalyc.org/pdf/539/53906402.pdf>
- UDC. (2014). HIDROLOGIA, Precipitacion. Recuperado de <[http://caminos.udc.es/info/asignaturas/grado\\_itop/415/pdfs/Capitulo 2.pdf](http://caminos.udc.es/info/asignaturas/grado_itop/415/pdfs/Capitulo%202.pdf)> [Acceso el 24 de junio de 2017].
- UDEP. (2015). CAPITULO 2: PRECIPITACION, 9–26. Recuperado de <[http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1\\_136\\_147\\_89\\_1257.pdf](http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1_136_147_89_1257.pdf)> [Acceso el 24 de junio de 2017].
- UNAVCO. (2018). Data Archive Interface v2. Recuperado de <http://www.unavco.org/data/gps-gnss/data-access-methods/dai2/app/dai2.html#grouping=Ecuador;scope=Station;sampleRate=normal;groupingMod=contains;groupingMod=contains>
- Villacís M, Vimeux F, Taupin JD. 2008. Analysis of the climate controls on the isotopic composition of precipitation ( $\delta^{18}\text{O}$ ) at Nuevo Rocafuerte, 74.5°W, 0.9°S, 250 m, Ecuador. *Comptes Rendus - Geoscience*340(1): 1–9. DOI: 10.1016/j.crte.2007.11.003.
- Zhang T., Wen J., Van der Velde R., Meng X., Li Z., Liu Y. & Liu R. (2008, 16 de marzo). Estimation of the Total Atmospheric Water Vapor Content and Land Surface Temperature Based on AATSR Thermal Data. *Sensors*. Recuperado de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/27879795>
- Zubieta, R., Saavedra, M., Silva, Y., & Giráldez, L. (2017). Erratum to: Spatial analysis

and temporal trends of daily precipitation concentration in the Mantaro River basin: central Andes of Peru (Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, (2016), 10.1007/s00477-016-1235-5). *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 31(2), 585. <https://doi.org/10.1007/s00477-016-1247-1>

## 9. ANEXOS

Anexo 1 Base de datos de los receptores GPS geodésicos (Plataforma virtual de acceso-UNAVCO)



<http://www.unavco.org/data/gps-gnss/data-access->

[methods/dai2/app/dai2.html#grouping=Ecuador;scope=Station;sampleRate=normal;groupingMod=contains;groupingMod=contains](http://www.unavco.org/data/gps-gnss/data-access-methods/dai2/app/dai2.html#grouping=Ecuador;scope=Station;sampleRate=normal;groupingMod=contains;groupingMod=contains)